

Zur belastungsoptimierten Routengenerierung im Straßenverkehr

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von: Ingmar Ehrenpfordt

aus: Wolfenbüttel

Eingericht am: 18.06.2008

Mündliche Prüfung am: 20.11.2008

Referenten: Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer
Prof. Dr. phil. habil. Frank Eggert

Berichte aus dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik

Band 4

**Zur belastungsoptimierten Routengenerierung
im Straßenverkehr**

Ingmar Ehrenpfordt

Herausgeber:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Verkehrssystemtechnik
Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig

ISSN 1866-721X

DLR-TS 1.4

Braunschweig, im August 2009

Institutsdirektor:
Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer

Verfasser:
Ingmar Ehrenpfordt

Vorwort des Herausgebers

Liebe Leserinnen und Leser,

In Ihren Händen halten Sie einen Band unserer Buchreihe „Berichte aus dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik“. In dieser Reihe veröffentlichen wir spannende, wissenschaftliche Themen aus dem Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) und aus seinem Umfeld. Einen Teil der Auflage stellen wir Bibliotheken und Fachbibliotheken für ihren Buchbestand zur Verfügung. Herausragende wissenschaftliche Arbeiten und Dissertationen finden hier ebenso Platz wie Projektberichte und Beiträge zu Tagungen in unserem Hause von verschiedenen Referenten aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik.

Mit dieser Veröffentlichungsreihe verfolgen wir das Ziel, einen weiteren Zugang zu wissenschaftlichen Arbeiten und Ergebnissen zu ermöglichen. Wir nutzen die Reihe auch als praktische Nachwuchsförderung durch die Publikation der wissenschaftlichen Ergebnisse von Dissertationen unserer Mitarbeiter und auch externer Doktoranden. Veröffentlichungen sind wichtige Meilensteine auf dem akademischen Berufsweg. Mit der Reihe „Berichte aus dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik“ erweitern wir das Spektrum der möglichen Publikationen um einen Baustein. Darüber hinaus verstehen wir die Kommunikation unserer Forschungsthemen als Beitrag zur nationalen und internationalen Forschungslandschaft auf den Gebieten Automotive, Bahnsysteme und Verkehrsmanagement.

Im vorliegenden Band ist ein neuartiger Ansatz zur Entlastung des Fahrers beschrieben, der mithilfe individualisierter Navigation zu mehr Sicherheit im Straßenverkehr führen könnte. Navigation erfüllt dabei mehr als die Funktion der Streckenführung auf dem schnellsten Weg zum Ziel. Vielmehr wird die Route anhand von Fahrerprofilen und Streckenmerkmalen so gewählt, dass der Fahrer auf einem „entspannten Weg zum Ziel“ gelangt. Die menschenzentrierte Entwicklung von Fahrerassistenz bietet auch für die Zukunft interessante Fragestellungen.

Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer

Vorwort des Autors

An erster Stelle möchte ich meinem Betreuer Herrn Prof.-Dr. Karsten Lemmer danken, der mich während der Erstellung der Arbeit fortwährend motiviert und das Erstgutachten übernommen hat.

Ein großer Dank geht an Herrn Prof. Dr. Frank Eggert für sein Engagement und die vielen ergebnisreichen Gespräche mit ihm. Außerdem danke ich ihm für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Ein weiterer Dank gilt Alvaro Catala Prat, Elmar Brockfeld und Ulf Noyer für die Unterstützung bei den softwaretechnischen Umsetzungen. Ebenfalls möchte ich mich für die Unterstützung durch zahlreiche Mitarbeiter des Instituts für Verkehrssystemtechnik beim DLR und der Abteilung für Psychologische Methodenlehre und Biopsychologie der TU Braunschweig bedanken.

Mein besonderer Dank gilt meiner Frau Susanne, meinen Töchtern Svenja und Annika und meinen Eltern, die mich durchweg in meinem Vorhaben motiviert haben und mir den nötigen Ausgleich und Rückhalt für die Anfertigung der Arbeit gegeben haben.

Ingmar Ehrenpfordt

Inhaltsverzeichnis

Vorwort des Herausgebers.....	iii
Vorwort des Autors	v
Abbildungsverzeichnis.....	xi
Kurzfassung.....	xiii
Abstract.....	xv
1 Einleitung	1
1.1 Entwicklung der Mobilität	1
1.2 Unterstützung des Fahrers.....	5
1.2.1 Grundlagen der Fahrzeugführung	6
1.2.2 Leistungsfähigkeit unter Berücksichtigung der Belastung.....	7
1.2.3 Entwicklung der Fahrerassistenzsysteme.....	8
1.2.4 Potentiale einer Assistenz auf Basis der Navigationsebene	10
1.3 Zielsetzung der Arbeit	11
2 Grundlagen der Navigation	13
2.1 Ortsbestimmung	14
2.1.1 Global Positioning System (GPS).....	15
2.1.2 Globalnaya Navigatsioannaya Sputnikova Sistema (GLONASS).....	15
2.1.3 Europäisches GNSS Galileo	16
2.1.4 Genauigkeitssteigerung mittels Korrekturdaten	17
2.1.5 GSM- und UMTS-basierte Ortungsverfahren	18
2.1.6 WLAN-Ausbreitung zur Positionsbestimmung	19
2.1.7 Bildbasierte Positionsbestimmung	19
2.2 Routengenerierung	20
2.2.1 Graphentheorie	20
2.2.2 Algorithmen zur Routenberechnung	21
2.2.3 Datenquellen.....	24
2.2.4 Dynamisierte Routengenerierung	25
2.2.5 Datenformate TPEG und AGORA-C	26
2.3 Zusammenfassung	26
3 Identifikation relevanter Merkmale für die individuelle Routenberechnung	29

3.1	Relevante Streckenmerkmale	29
3.2	Relevante Personenmerkmale	31
3.2.1	Demografische Merkmale	32
3.2.2	Fahrdemografische Merkmale	34
3.2.3	Motivbasierte Merkmale	35
3.2.4	Nutzung der Physiologie zur Fahrertypisierung	39
3.2.5	Modell der Belastung und Beanspruchung	40
3.2.6	Physiologische Beanspruchungsmessungen	41
3.3	Zusammenfassung	47
4	Konzept und Auswirkungen der individualisierten Routenplanung	49
4.1	Einflüsse auf den Beanspruchungszustand	51
4.2	Integration in das bestehende Navigationssystemkonzept	52
4.3	Voraussetzungen für eine Umsetzung	53
4.3.1	Bedingungen der Erhebung	53
4.3.2	Beispielhafte Darstellung einer Fragebogenstudie	54
4.3.3	Vermeidungsstrategien und individuelle Leistungsfähigkeit	55
5	Subjektive Daten zur individualisierten Streckenbewertung	59
5.1	Explorative Identifikation von Fahrerpräferenzen	59
5.2	Fragebogenstudie zur Charakterisierung und Klassifikation von Fahrer- und Fahrsituationstypen	60
5.2.1	Versuchsdesign und Durchführung	60
5.2.2	Auswertung	61
5.3	Belastungsermittlung im Fahrversuch mittels Selbstauskunft	64
5.3.1	Versuchsdesign und Durchführung	64
5.3.2	Auswertung	65
5.4	Ergebnisdiskussion	66
6	Objektivierung der Fahrer-Streckeninteraktion durch Messung psychophysiologischer Daten	69
6.1	Untersuchung des grundlegenden Anpassungspotentials	70
6.1.1	Versuchsdesign	70
6.1.2	Durchführung	73
6.1.3	Auswertung	75
6.1.4	Ergebnisse und deren Auswirkung auf die Umsetzung	77
6.2	In-depth-Analyse des Anpassungspotentials	77
6.2.1	Versuchsdesign	78
6.2.2	Durchführung	79
6.2.3	Auswertung	80
6.3	Ermittlung des relevanten Indikators aus den Fahrdaten	85

7 Umsetzung einer individualisierten Routenplanung aufgrund objektiver Beanspruchungsdaten	87
7.1 Basiskonzept der neuen Routenplanung	87
7.2 Testkampagne im Realverkehr	89
7.2.1 Ermittlung eines persönlichen Belastungsprofils.....	89
7.2.2 Die Generierung der individualisierten Streckenführung	90
7.3 Auswertungsmethodik und quantitative Verifikation.....	92
7.4 Diskussion der Ergebnisse.....	94
8 Zusammenfassung und Ausblick.....	97
Abkürzungsverzeichnis.....	99
Literaturverzeichnis	103
9 Anhang.....	115
Anhang A - Pseudocode Dijkstra	115
Anhang B - Fahrmotive, Fahrstile, Gefühle & Einstellungen zur Bedeutung des Autos nach Adel et al. (1997).....	116
Anhang C – Fragebogen zur Fahrertypisierung	117
Anhang D – Auswertung individuell Entspannte Routen	131
Anhang E – Auswertung.....	134

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Straßenverkehrsnetzausbau in Deutschland (BMVBW, 2004)	2
Abbildung 2: Gesamtfahrleistung in Deutschland (BMVBS, 2007)	2
Abbildung 3: Prognose der Bevölkerungsentwicklung (UNO, 2007)	3
Abbildung 4: Bevölkerungsentwicklung in Deutschland (Berlin-Institut, 2006)	4
Abbildung 5: Entwicklung der Verletztenzahlen (BMVBS, 2007)	4
Abbildung 6: Entwicklung der Verkehrstotenzahlen (Statistisches Bundesamt, 2006)	5
Abbildung 7: Drei-Ebenen-Modell der Fahrzeugführung nach Bernotat (1970)	6
Abbildung 8: Yerkes-Dodson-Gesetz (Yerkes & Dodson, 1908)	8
Abbildung 9: Entwicklung der Fahrerassistenzsysteme (Valsan, 2007)	9
Abbildung 10: Beispiel eines gerichteten, knoten- und kantenbewerteten Graphen	20
Abbildung 11: Konfliktpunkte in Kreuzungen (Haller, 2006)	30
Abbildung 12: Kategorisierung relevanter Fahrsituationen	31
Abbildung 13: Hauptverursacher von PKW-Unfällen 2005 in [%] (Vorndran, 2006)	33
Abbildung 14: Verkehrsunfälle 2003 (Statistisches Bundesamt, 2005)	33
Abbildung 15: Modell der Belastung und Beanspruchung (Schmidtke & Bubb, 1993)	40
Abbildung 16: Darstellung der Messung des Interbeat-Intervalls	42
Abbildung 17: Blickerfassungssystem im Versuchsfahrzeug ViewCar®	46
Abbildung 18: Modifiziertes Yerkes-Dodson-Gesetz (Ehrenpfordt & Eggert, 2007)	51
Abbildung 19: Einbindung der neuen Optionen in bestehende Navigationssysteme	52
Abbildung 20: Erwerb von Fahr- und Verkehrsexpertise nach Rasmussen (1996)	55
Abbildung 21: Übersicht demografischer und fahrdemografischer Clustereigenschaften	63
Abbildung 22: Beurteilung der Anstrengung von Verkehrssituationen nach Kullack (2006)	66
Abbildung 23: Streckenverlauf der Versuchskampagne 2005/2006 (Map24Deutschland, 2007)	71
Abbildung 24: Darstellung einer Situationsdefinition (Stadt Braunschweig, 2003)	72
Abbildung 25: Sensorik des Versuchsfahrzeugs ViewCar®	73
Abbildung 26: Z-Wert des IBI in leichten und schwierigen Situationen nach Kullack (2006)	76
Abbildung 27: Geschwindigkeit in leichten und schwierigen Situationen nach Kullack (2006)	77
Abbildung 28: Streckenübersicht der Versuchskampagne 2006/2007 (Map24Deutschland, 2007)	79
Abbildung 29: Visualisierung physiologischer Daten mittels GIS	81
Abbildung 30: Darstellung der Auswertung der Herzrate	83
Abbildung 31: Softwareprogramm AroundViewCar (Catala Prat, 2006)	84
Abbildung 32: Routenplanung mit der Option <i>Schnellste Route</i>	91
Abbildung 33: Routenplanung mit der Option <i>Entspannte Route</i>	92

Kurzfassung

Fahrerassistenzsysteme sollen die steigende Belastung bei der Fahrzeugführung kompensieren. Vornehmlich geschieht dies auf der Bahnführungs- und Stabilisierungsebene nach Bernotat (1970). Die belastungsoptimierte Routenplanung erschließt das noch ungenutzte Potential der Planungsebene.

Eingehend werden potentielle Nutzergruppen über eine modifizierte, motivbasierte Fahrertypisierung mittels Fragebogen ermittelt und das Potential einer individuellen, belastungsoptimierten Routenplanung aufgezeigt.

Im Weiteren erfolgt die Ermittlung individueller Belastungsprofile auf Basis realer Fahrdaten. Dabei wird die Reaktion des Fahrers in neun relevanten Infrastrukturkombinationen ermittelt, welche sich aus Straßenkategorien und potentiellen Interaktionspunkten mit anderen Verkehrsteilnehmern zusammen setzen. Das resultierende Profil verändert später die Gewichtungsfunktion in der Routenberechnung.

Es ergeben sich zwei potentielle Nutzungen eines individuellen Belastungsprofils: eine entlastende Streckenführung, die *Entspannte Route*, und eine Streckenführung mit Trainingscharakter, die *Aktive Route*. Infrastrukturbereiche mit einem erhöhten, individuellen Gefährdungspotential können dabei gemieden, oder gezielt trainiert werden. Eine Umsetzung erfolgt mit der Option *Entspannten Route* unter Verwendung der Herzrate als physiologisches Beanspruchungsmaß.

Das Konzept wird abschließend in einem modifizierten Routenplaner umgesetzt und validiert. Methodisch kommen GIS-Anwendungen, visuelle Fahrdatenauswertungen, sowie Filter- und Aufbereitungsalgorithmen zur Anwendung.

Der Nachweis wird erbracht, dass die *Entspannte Route* zu einer signifikant geringeren Beanspruchung beim Fahrer führt, als die *Schnellste Route*. Eine belastungsoptimierte Routenplanung kann somit die persönliche und die allgemeine Verkehrssicherheit erhöhen.

Die entwickelte Methode zur Generierung der Fahrerprofile ließe sich zukünftig zur Identifikation von allgemein belastenden Infrastrukturbereichen nutzen und, um Trassierungsrichtlinien zu erweitern.

Abstract

Driver Assistance Systems were developed to compensate increasing driver workload. That happens so far primarily focussed on the guidance level and the stabilization level of the vehicle guidance model of Bernotat (1970). The individualized route planning addresses the unused potential of the navigation level.

Firstly potential user groups are identified by using a modified motif based questionnaire. Also the potential of the individualized, workload-optimized routing is highlighted.

Furthermore individual driver profiles based on workload were generated using real driving data. The reaction of the driver in nine predefined combinations of infrastructure is used to generate the driver's profile. For this differentiation a combination of road categories and potential points of interaction with other road users is used. The adjustment of the weighting factors used within the route planning process is based upon the driver's profile.

As a result the individual drivers profile will enable to build up two new routing applications: a routing with low stress to the driver, the *Relaxed Route*, and a routing with the potential of training the driver, the *Active Route*. Traffic infrastructure combinations with a slightly higher, individual hazard potential can be avoided, or if needed be trained. Only the new routing option *Relaxed Route* is developed using the heart rate as the basic physiological indicator.

The described concept of an individualized route planning was implemented in a route planer and tested. GIS applications, visual evaluation of driving data, as well as various data processing and filtering algorithms were part of the basic methods.

It was demonstrated that the *Relaxed Route* leads significantly to less drivers strain compared to the *Fastest Route*. A workload-optimized route planning can increase the personal and the general road safety.

The developed method generating drivers' profiles could be used to identify infrastructure with a general potential of higher workload to the driver to extend the alignment guidelines.

1 Einleitung

1.1 Entwicklung der Mobilität

Der Wunsch nach Mobilität und die Notwendigkeit, mobil zu sein, sind grundsätzliche Voraussetzungen für die kulturelle Entwicklung der Menschheit. Diente die Mobilität zunächst nur der unmittelbaren Nahrungsbeschaffung, wurde sie mit steigender Bevölkerungszahl notwendig, um neue Nahrungsgebiete zu erschließen (Schmitz, 1994). Durch die Erfindung des Rades und später mittels Kombination von Rädern und Antrieben, perfektionierten die Menschen die Fähigkeit, ihre Mobilität zu steigern und zu optimieren. Entfernte Gebiete konnten somit als neue Lebensräume erschlossen und eine wesentliche Voraussetzung für die Entwicklung des Warenverkehrs geschaffen werden.

Neben der Entwicklung von Fortbewegungsmitteln wurde im Allgemeinen der Fahrwegbau ebenfalls perfektioniert und an unterschiedliche Voraussetzungen angepasst. Hochkulturen wie beispielsweise die Römer legten Straßen- und Entwässerungssysteme an, um eine weitgehende Unabhängigkeit der Fortbewegung von der Witterung zu erhalten. Dieser Aspekt führte später im bodengebundenen Verkehr zunächst zu einer weitgehenden Expansion des Schienenverkehrs im 19. Jahrhundert. Durch die Erfindung des „Auto-Mobils“ entwickelte sich dann im 20. Jahrhundert der motorisierte Individualverkehr auf der Straße. Neben der Witterungsunabhängigkeit erfüllen die Automobile auch das mehr oder minder starke Bestreben des Individuums nach Autonomie.

Mittlerweile ist die vorhandene Straßeninfrastruktur in den Industrienationen und den prosperierenden Entwicklungsländern weitgehend ausgelastet bzw. überlastet. Da die Dichte des Straßenverkehrsnetzes nicht nur in Ballungszentren an ihre Grenzen gestoßen ist, kommt dem Optimierungsaspekt des Verkehrsflusses immer mehr Bedeutung zu. Dies spiegelt sich unter anderem in dem vom Bundeskabinett am 2. Juli 2003 für die Bundesrepublik Deutschland ausgegebenen Bundesverkehrswegeplan wider. Dieser sieht für den Zeitraum von 2001 bis 2015 Aufwendungen für die Erhaltung der Bestandsnetze im Bereich der bundeseigenen Schienenwege, der Bundesfernstraßen und der Bundeswasserwege in Höhe von 83 Milliarden € vor. Für den Neu- und Ausbau der vorgenannten Verkehrsinfrastrukturen sind 66 Mrd. € im gleichen Zeitraum eingeplant (Mann et al., 2001). Die bisherige Entwicklung des Straßenverkehrsnetzes in der Bundesrepublik Deutschland ist in unten stehender Abbildung 1 dargestellt.

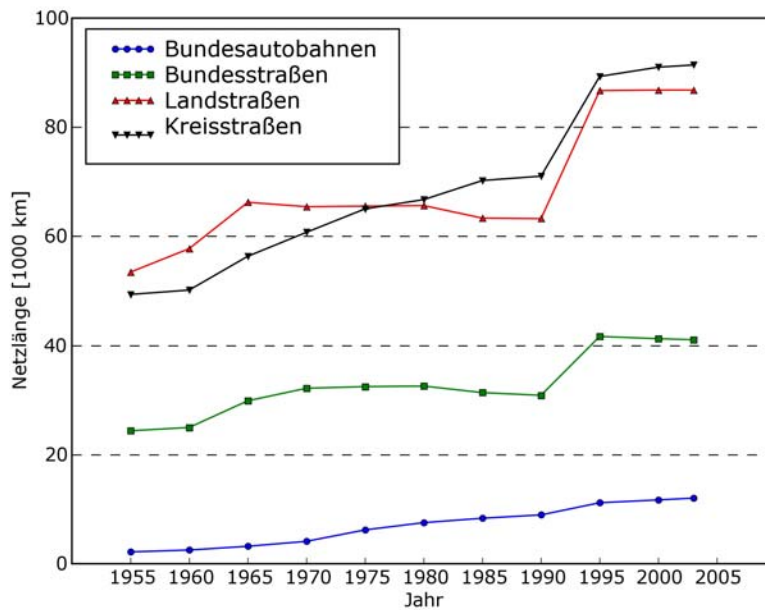


Abbildung 1: Straßenverkehrsnetzausbau in Deutschland (BMVBW, 2004)

Außer dem sprunghaften Anstieg, mit Beginn der neunziger Jahre, welcher auf die Deutsche Wiedervereinigung zurückzuführen ist, lässt sich kein signifikanter Trend im Neubau über die letzten Dekaden erkennen. Die Gesamtlänge des öffentlichen Straßennetzes stagniert bei ungefähr 231.000 Kilometern Streckenlänge.

Die Fahrleistung stieg im gleichen Zeitraum im Gegensatz zu der Länge des Straßenverkehrsnetzes stetig an, was die Abbildung 2 verdeutlicht (BMVBS, 2007).

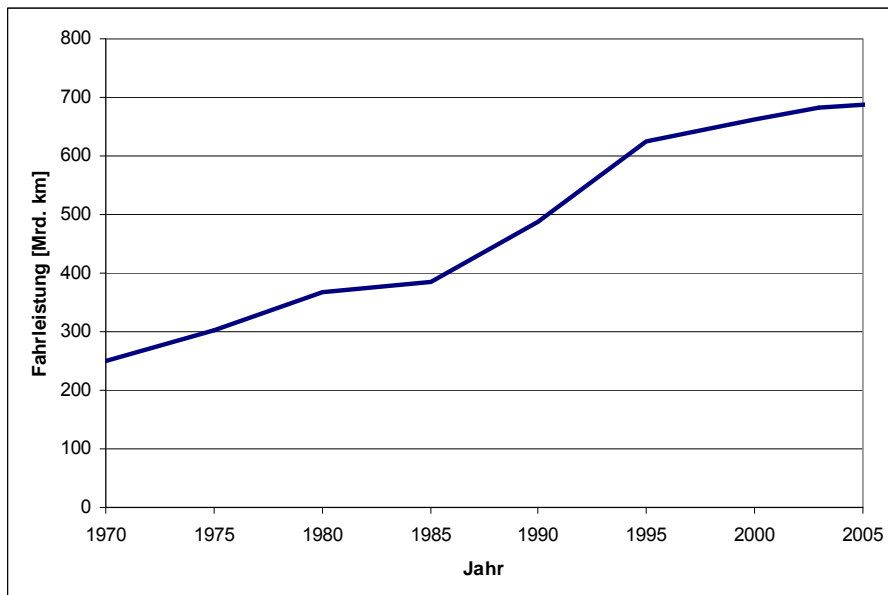


Abbildung 2: Gesamtfahrleistung in Deutschland (BMVBS, 2007)

Einhergehend mit dem steigenden Verkehrsaufkommen auf dem vorhandenen Streckennetz werden daher vermehrt Systeme entwickelt, welche zum einen den Verkehrsablauf optimie-

ren helfen, zum anderen den Fahrer bei seiner immer komplizierter und komplexer werdenden Aufgabe der Fahrzeugsteuerung entlasten sollen. Das Ziel solcher Systeme ist es, das Fahren sicherer, effizienter, einfacher und komfortabler zu gestalten.

Eine grundlegende Unterteilung solcher Systeme kann nach dem Ort in fahrzeugseitig installierte und streckenseitige Systeme vorgenommen werden. Die so genannten Fahrerassistenzsysteme (FAS), mit Komfort- und Sicherheitsfunktionen, werden dabei den fahrzeugseitigen Systemen zugeordnet. Die streckenseitigen Systeme finden sich hauptsächlich im Rahmen des Verkehrsmanagements, insbesondere bei der Verkehrslenkung und der Verkehrsflusssteuerung wieder.

Für das wachsende Verkehrsaufkommen ist neben dem steigenden Wunsch nach Mobilität auch die demografische Entwicklung ausschlaggebend, welche nicht nur in den Industrienationen zu einer allgemein höheren Lebenserwartung führt (Greißinger, 2003).

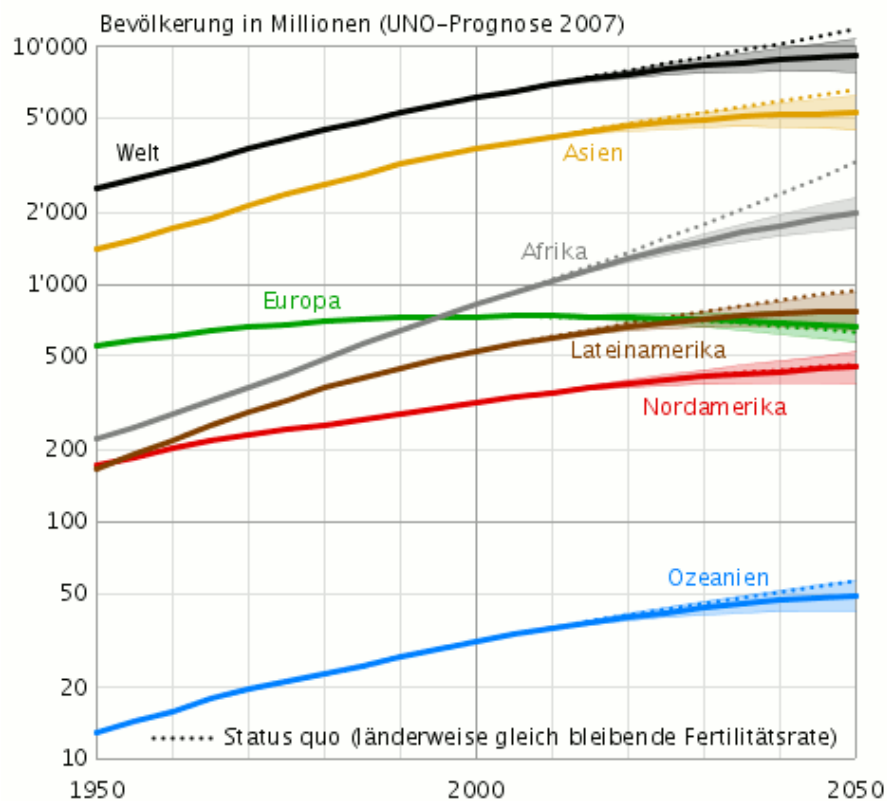


Abbildung 3: Prognose der Bevölkerungsentwicklung (UNO, 2007)

Die Auswirkungen der gesellschaftlichen Alterung in Deutschland zeigen die Extrapolationen von Eisenmenger et al. aus dem Jahr 2006. Die 11. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung erfolgte dabei auf Basis der Entwicklung der Bevölkerungszahlen ab dem Jahr 1950 (Eisenmenger et al., 2006). Eine grafische Aufbereitung wurde vom „Berlin-Institut für Bevölkerung und Entwicklung“ durchgeführt. (Berlin-Institut, 2006). Sie ist in der folgenden Abbildung exemplarisch für drei ausgewählte Jahre angeführt. Der Trend lässt sich jedoch bereits deutlich ablesen.

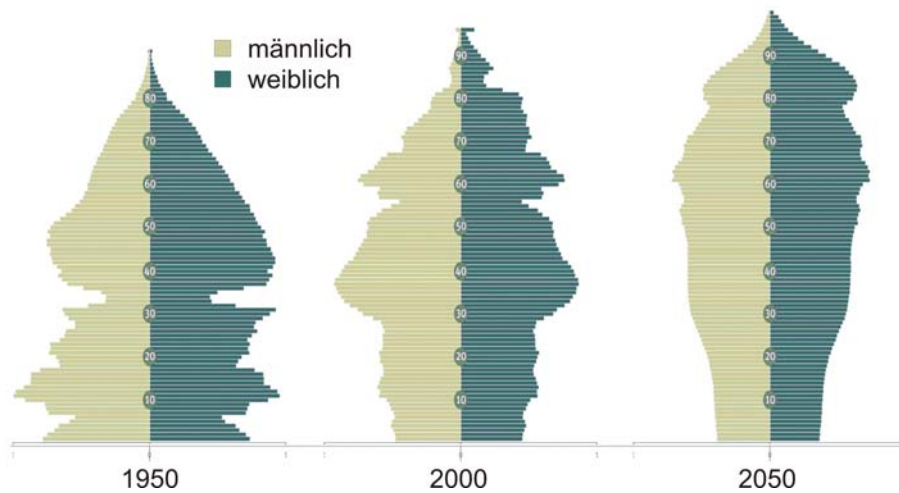


Abbildung 4: Bevölkerungsentwicklung in Deutschland (Berlin-Institut, 2006)

Während das maximale Alter und die Zahl der über 70-Jährigen deutlich ansteigen, nimmt die Größe der einzelnen Bevölkerungsfractionen weiter ab.

Einhergehend mit der steigenden Personenzahl mit Führerschein und der Verfügung über ein Fahrzeug, wuchs zunächst auch die Zahl der Verkehrsunfälle. Die Anzahl der dabei verletzten Personen stagnierte allerdings über die Jahre nahezu, was Abbildung 5 veranschaulicht.

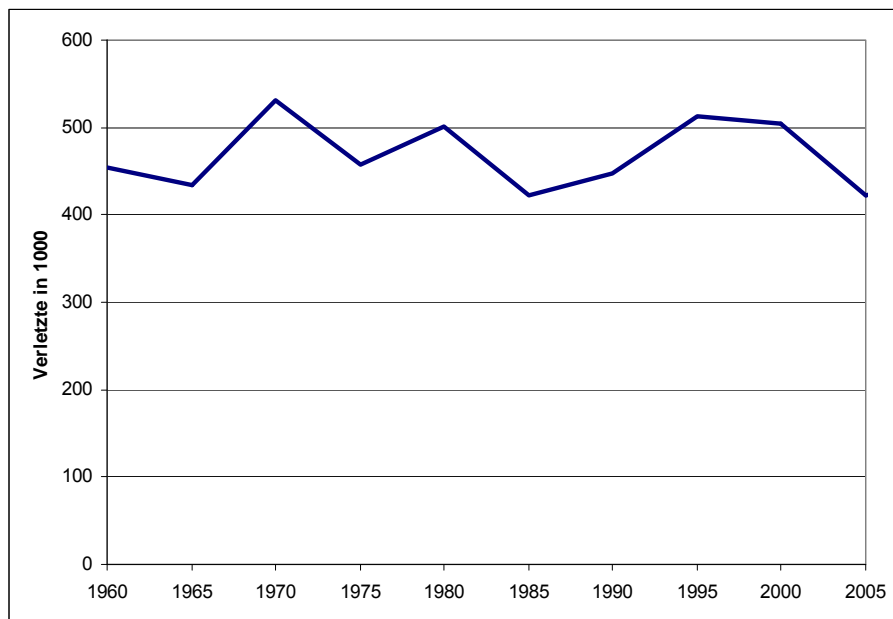


Abbildung 5: Entwicklung der Verletztetenzahlen (BMVBS, 2007)

Die Anzahl der bei einem Verkehrsunfall getöteten Personen verringerte sich seit Einführung der ersten, zunächst passiven Sicherheitssysteme im Fahrzeug zu Beginn der 70er Jahre sogar. Die Abbildung 6 zeigt diesen positiven Trend, welcher sich weiter fortsetzt.

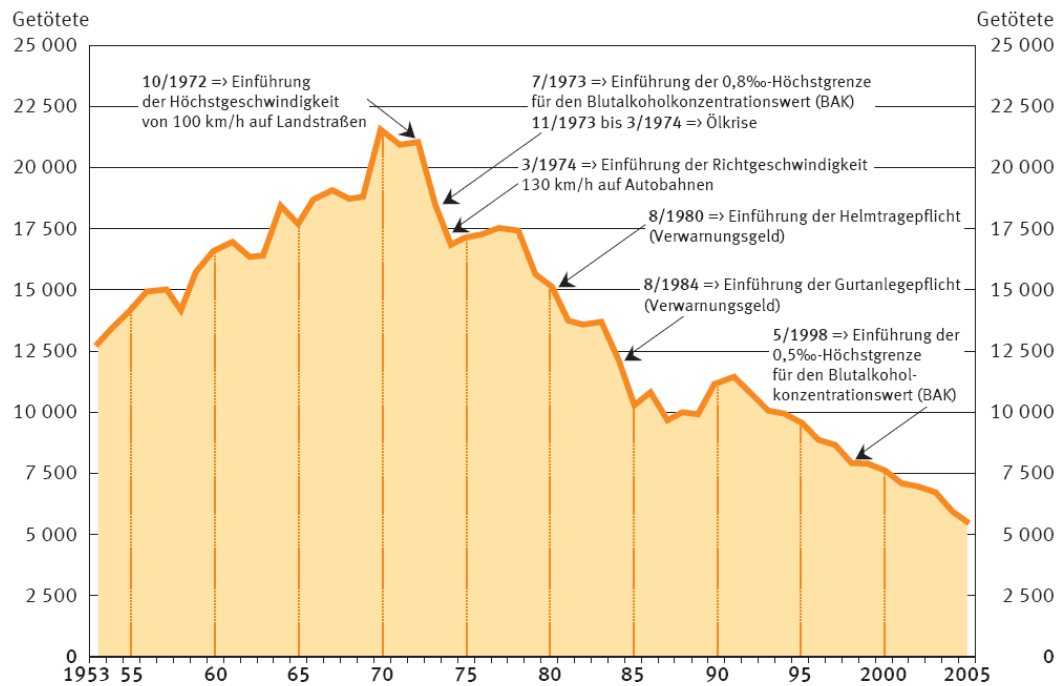


Abbildung 6: Entwicklung der Verkehrstotenzahlen (Statistisches Bundesamt, 2006)

Aufgrund der gesellschaftlichen Relevanz spiegelt sich die politische Bedeutung der Verringerung der im Straßenverkehr getöteten Personen auch in entsprechenden politischen Forderungen wider. Die Europäische Kommission verlangt beispielsweise in ihrem Weißbuch eine Halbierung der Verkehrstoten in Europa zwischen den Jahren 2000 und 2010 (Europäische Kommission, 2001). Eine komplette Reduzierung der Verkehrstotenzahlen wurde in der *Vision Zero* in Schweden gesetzlich gefordert (SRA, 2006). Auch wenn dies wahrscheinlich nicht erreicht werden kann, so ist die Zielrichtung offensichtlich.

1.2 Unterstützung des Fahrers

Die Entwicklung von Systemen, welche den Fahrer unterstützen, geht einher mit der Entwicklung der Automobiltechnologie. Nicht nur das steigende Verkehrsaufkommen, sondern auch die ständige Erhöhung der Leistungsfähigkeit der Fahrzeuge geben den Anlass dazu.

Die Aufgabe des Fahrzeugführers erfordert aufgrund gesteigerter Fahrdynamik, höherem Beschleunigungsvermögen und höheren gefahrenen Geschwindigkeiten im Allgemeinen immer mehr Aufmerksamkeit und Konzentration des Fahrers. Zusätzlich soll der Fahrkomfort erhöht werden, was zu der Entwicklung entsprechender Assistenzen führt. In Kapitel 1.2.3 wird auf diese Entwicklung im Bereich der Fahrerassistenzsysteme und auf korrespondierende Forschungsprojekte genauer eingegangen.

1.2.1 Grundlagen der Fahrzeugführung

Um Vorgänge und Zusammenhänge der Aktionen beim Fahren ergründen und gezielt beeinflussen zu können, wurde von Bernotat ein Modell entwickelt (Bernotat 1970). Dieses gliedert die Aufgabe der Fahrzeugführung in drei Ebenen, wie es in Abbildung 7 dargestellt ist. Die grundlegende Herangehensweise wurde 1983 von Rasmussen und später auch von Donges und Naab aufgegriffen (Donges & Naab, 1996).

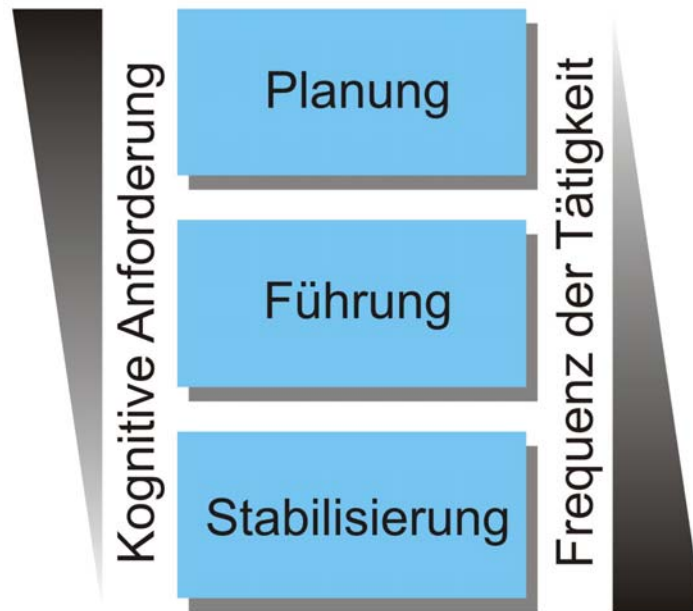


Abbildung 7: Drei-Ebenen-Modell der Fahrzeugführung nach Bernotat (1970)

Die oberste, primäre **Ebene der Planung** summiert die wissensbasierten Verhaltensweisen, welche elementar für die Durchführung einer Fahrt sind. Es handelt sich dabei um die Routenplanung vor Fahrtantritt, deren situative Anpassung während der Fahrt sowie die Orientierung und Navigation während des Fahrens. Zu den zuvor genannten, räumlichen Faktoren kommen außerdem die zeitlichen Faktoren hinzu. Diese beziehen sich auf die chronologische Planung der Fahrt. Kontextuelle Faktoren seien hier ebenfalls erwähnt, welche die Einbindung der Fahrt in den äußeren Zusammenhang des Fahrers und seine Umwelt darstellen. Da sie jedoch primär nicht zum Bereich der Fahrzeugführung gehören, spiegeln sie sich in dem Modell nicht direkt wider.

Die mittlere, sekundäre **Ebene der (Bahn-)Führung** fundiert auf regelbasiertem Verhalten, welches maßgeblich auf der Wiedererkennung von gespeicherten Reizkonstellationen beruht. Hierunter subsumiert man zum Beispiel die Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern, die Beachtung der Verkehrsvorschriften und die Wahl der Geschwindigkeit. Ausgehend von den aufgenommenen äußeren Reizen müssen mögliche Reaktionen abgewogen werden. Nach dem anschließenden Auswahlprozess des akkuraten Antwortschemas erfolgt die Umsetzung in koordinierte Reaktionen.

Die unterste, tertiäre **Ebene** des Modells befasst sich mit **der Stabilisierung** des Fahrzeugs. Es erfolgt eine Umsetzung der ausgewählten Reaktionen aus der (Bahn-)Führungsebene in konkrete Handlungen. Darunter fallen beispielsweise Anpassungen in der Längsführung wie Bremsen und Gas geben, ebenso wie die Aufgaben der Querführung, welche sich auf das Lenken beziehen. Die dritte Ebene summiert das fertigkeitsbasierte Verhalten, wobei eine vorbewusste Signalverarbeitung stattfindet.

Die Tätigkeitsfrequenz ist auf der letztgenannten Ebene am höchsten und nimmt mit den Ebenen nach oben hin deutlich ab. Reziprok dazu verhält sich die kognitive Anforderung an den Fahrer, welche deutlich vom fertigkeitsbasierten Handeln zum bewussten Entscheiden hin ansteigt (siehe Abbildung 7).

1.2.2 Leistungsfähigkeit unter Berücksichtigung der Belastung

Die grundlegenden Untersuchungen des Zusammenhangs zwischen Belastung und Leistungsfähigkeit wurden 1908 von Robert M. Yerkes und John D. Dodson an der Harvard Universität in den USA durchgeführt (Yerkes & Dodson, 1908). Das nach ihnen benannte Yerkes-Dodson-Gesetz spiegelt allgemein den Zusammenhang zwischen Leistungsfähigkeit und Erregungsniveau, auch Arousal genannt, wider. Die Psychologen Yerkes und Dodson untersuchten die Beziehung zwischen der Stärke eines äußeren Reizes und der Schnelligkeit des Lernens von Vermeidungsverhalten. Das grundlegende Experiment wird im Folgenden kurz erläutert.

Es wurden Ratten darauf trainiert, ihren Käfig durch eine von zwei Türen zu verlassen, wobei die Türen unterschiedliche Farben aufwiesen. Die Farben der Türen wurden anschließend ausgewechselt, so dass die Ratten lernten, die Türen anhand ihrer Farbe anstatt ihrer Position zu unterscheiden. Liefen sie durch die falsche Tür, bekamen sie einen elektrischen Schock. Die Stärke des Schocks wurde variiert und es zeigte sich, dass die Ratten bei leichten und sehr starken Schocks länger brauchten, bis sie hintereinander 10-mal durch die richtige Tür liefen. Am schnellsten lernten die Ratten bei mittelstarken Schocks. Anschließend veränderten Yerkes und Dodson die Schwierigkeit der Aufgabe, indem sie mehr bzw. weniger Licht in den Gang hinter der weißen Tür ließen. Bei mehr Licht (leichtere Aufgabe) lernten die Ratten bei dem stärksten Schock am schnellsten und am langsamsten bei dem schwächsten Schock. In der schwierigeren Aufgabe (weniger Licht) hingegen lernten sie durch den zweitkleinsten Schock am schnellsten.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Leistungsfähigkeit bei mittlerem Erregungsniveau am besten ist und dass das optimale Erregungsniveau von der Schwierigkeit der Aufgabe abhängt. Bei leichten Aufgaben liegt es höher. Während ein hohes Erregungsniveau eher die Leistung bei leichten/einfachen Aufgaben erleichtert, vereinfacht ein niedriges Erregungsniveau eher die Leistung bei schwierigen oder komplexen Aufgaben.

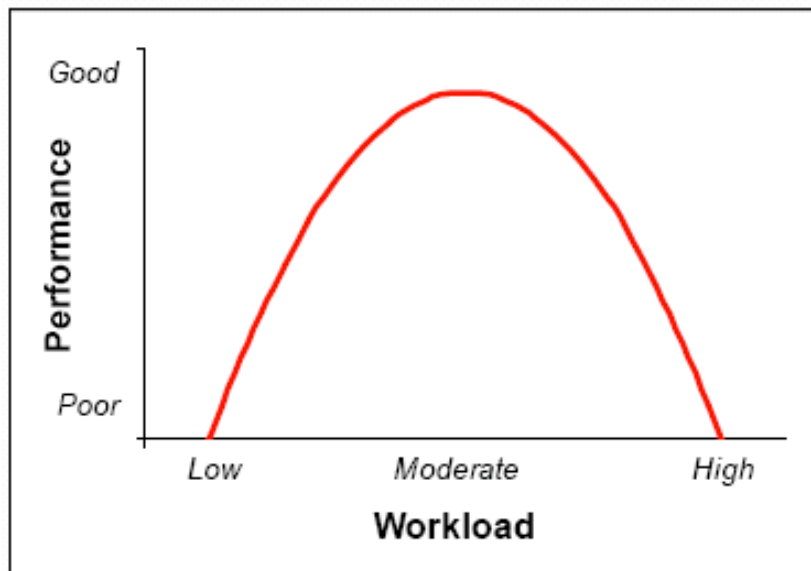


Abbildung 8: Yerkes-Dodson-Gesetz (Yerkes & Dodson, 1908)

Bis heute gibt es unterschiedliche Vorstellungen und Befunde zur genauen Form der Kurve des Yerkes-Dodson-Gesetzes, wobei sie von manchen eher als rund, flach und symmetrisch postuliert wird, von anderen eher als spitz und asymmetrisch. Abbildung 8 zeigt eine idealtypische Darstellung, wie sie für die vorliegende Arbeit als Grundlage angenommen wird. Auf die Einbindung des Yerkes-Dodson-Gesetzes in die zugrundeliegende Arbeit wird in Kapitel 4.1 eingegangen.

1.2.3 Entwicklung der Fahrerassistenzsysteme

Aufbauend auf die oben angeführten und weiteren Grundlagen wurden verschiedene Studien und Forschungsprojekte durchgeführt, welche die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen zum Ziel hatten. Eine von der weltweit tätigen Unternehmensberatung Frost & Sullivan durchgeführte Studie aus dem Jahr 2006 zeigt die Entwicklung der Fahrerassistenzsysteme von 1995 bis zum Jahre 2015 auf.

Die Erhöhung der Verkehrssicherheit besitzt, wie bereits angeführt, gesellschaftlich eine hohe Relevanz, was sich in landesspezifischen, bundes-, und europaweiten Förderprogrammen widerspiegelt. Auf der Bundesebene wurden beispielsweise vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und dem Bundesministerium für Wirtschaft (BMWi) verschiedene Förderprogramme initiiert, welche die Mobilität und Verkehrssicherheit gleichermaßen fördern sollen. Das Rahmenprogramm „Verkehrsmanagement 2010“, welches neue Technologien und Verbesserungen im Bereich der Verkehrsflusssteuerung fördert, sei hier als Beispiel angeführt (BMWi, 2003).

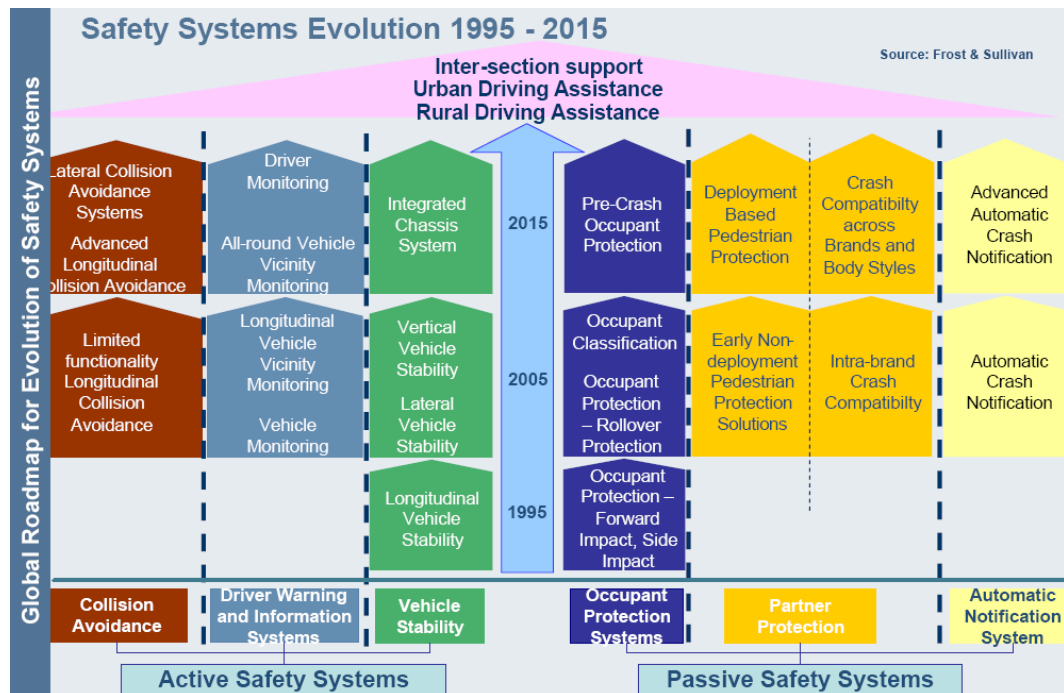


Abbildung 9: Entwicklung der Fahrerassistenzsysteme (Valsan, 2007)

Im Bereich der EU spiegelt sich die bereits in Kapitel 1 angeführte Forderung aus dem Weißbuch in den Forschungs-Rahmenprogrammen wider. Im aktuellen 7. Forschungsrahmenprogramm der EU finden sich neben der globalen Ausrichtung auf das Thema auch spezifische Ausschreibungsbereiche.

Dass die Weiter- und Neuentwicklung von Fahrerassistenzsystemen aktuell eine hohe Relevanz besitzt, wird ebenfalls durch den Aufbau entsprechender Forschungsabteilungen und Forschungseinrichtungen, wie dem Institut für Verkehrssystemtechnik (ehem. Institut für Verkehrsführung und Fahrzeugsteuerung) beim DLR, sichtbar. Neben der Fokussierung auf eine Verbesserung von Sensorik und Erfassungsmethodik rückt ebenfalls die Betrachtung des Fahrers weiter in den Vordergrund. Die Bedienbarkeit durch den Nutzer muss gewährleistet sein, was sich unter anderem in Ergebnissen aus dem Institut für Verkehrssystemtechnik zeigt (Lemmer, 2003; Lemmer, 2004; Lemmer, 2005).

Welches Potential dabei Navigationssysteme in Kombination mit Kommunikationstechnologien besitzen, und wie sie einen weiteren Schritt in der Entwicklung von neuen FAS bestreiten, wird an diversen Forschungsergebnissen sichtbar (Kersken, 2005; Eisenlauer, 2006; Lau, 2006; Ortgiese, 2007).

Zu den nennenswerten Forschungsprojekten mit Relevanz zu der vorliegenden Arbeit zählen unter anderem S.A.N.T.O.S. und AKTIV. Das vom BMWi geförderte Projekt S.A.N.T.O.S. befasste sich mit der Erhöhung von Sicherheit und Fahrkomfort im Kontext der wachsenden Anzahl von Fahrerinformations- und -assistenzsystemen. Diese Erhöhung soll durch eine individuelle, adaptive und integrierte Form der Fahrerassistenz erreicht werden. Die relevanten Projektinhalte von S.A.N.T.O.S. sind in Kapitel 3.2.3 angeführt. Ausführlichere Informationen finden sich bei König (König, 2002).

Die Forschungsinitiative „AKTIV - Adaptive und Kooperative Technologien für den Intelligen-ten Verkehr“ beschäftigt sich mit der Problemstellung, wie man den Verkehr flüssiger und sicherer gestalten kann (AKTIV, 2007). An dem vom BMWi geförderten Projekt sind 29 Part-ner beteiligt, welche aus dem Umfeld der Automobilhersteller, der Forschung, der Telekom-munikations- und Elektroindustrie sowie Zulieferern aus den benannten Industriezweigen stammen.

Unter dem Thema *Fahrsicherheit und Aufmerksamkeit* wird unter anderem der Aufmerksam-keitsgrad des Fahrers, also eine Art Fahrerzustand, in die Entwicklung der Warn- bzw. Ein-greifstrategien mit einbezogen. Hierbei soll das HMI auf den individuellen, situativen Auf-merksamkeitsgrad des Fahrers angepasst sein, um eine optimale Reaktion des Fahrers zu er-langen (Hipp, 2006).

1.2.4 Potentiale einer Assistenz auf Basis der Navigationsebene

Bislang erfolgt die Entwicklung von sicherheitskritischen Fahrerassistenzsystemen auf der Füh-rungs- und Stabilisierungsebene. Sie betrifft dabei hauptsächlich die Verbesserung der Fahr-dynamik. Die Systeme unterstützen den Fahrer in Situationen, in welchen er aufgrund seines Reaktionsvermögens und der beschränkten Präzision der Ausführung nicht in der Lage ist, das Fahrzeug fehlerfrei zu führen. Die Defizite in den Fähigkeiten und den Fertigkeiten werden von den zugrundeliegenden Systemen kompensiert.

Die Nutzung des potentiellen Sicherheitsgewinns, resultierend aus der Navigationsebene, wurde bislang nur selten in Betracht gezogen (Ehrenpfordt & Rataj, 2005a, Ehrenpfordt & Rataj, 2006a). Allenfalls ist eine Personalisierung der Routenplanung aus Komfort- und Akzep-tanzgründen bekannt. Die wichtigsten Ansätze hierzu seien an dieser Stelle kurz angeführt.

Aktuelle Untersuchungen von Park et al. beziehen sich z.B. auf eine Individualisierung der Routenplanung mittels statistischer Auswertungen (Park et al., 2007). Hierbei erfolgte die Per-sonalisierung über ein Softwaretool, welches mit Hilfe von Entscheidungsbaummethoden die Präferenzen von Nutzern auswertet und in neue Routenkalkulationen einfließen lässt.

Einen ähnlichen Ansatz zur Generierung einer personalisierten Routenplanung wird von Pang und Chu verfolgt (Pang & Chu, 2007). Die Auswahl von Routen wird mittels Fuzzylogic nach-gebildet und es werden mehrere Vorschläge der Routenführung zur Auswahl angezeigt. Das System lernt anschließend aus der Wahl des Fahrers etwas über seine Präferenzen und bildet diese bei weiteren Routenkalkulationen ab. So aktualisiert sich das System automatisch. Prob-lematisch ist hierbei allerdings die Wahl der ersten Ausgangsparameter, welche den größten Unsicherheitsfaktor besitzen.

Es werden auch spezielle Anpassungen, z.B. an die Belange von Rollstuhlfahrern erforscht. Tsuji und Novaza untersuchten die Beanspruchung des Fahrers, wobei dies sowohl mit dem Nasa-TLX als auch über EMG-Auswertungen erfolgt (Tsuji & Novaza, 2007). Wichtige Kriterien stellen bei dieser Art von Routenplanung die Längs- und Querneigung sowie die Oberflächen-beschaffenheit in Bezug auf Unebenheiten dar.

Die der vorliegenden Arbeit zugrundeliegende Idee unterscheidet sich grundsätzlich von den Ansätzen in der bisherigen Forschung, da sie sich primär der Erhöhung der persönlichen und allgemeinen Verkehrssicherheit widmet und nur nachrangig als Komfortfunktion verstanden werden kann.

Um eine solche Idee in ein reales System umsetzen zu können, werden Aspekte der räumlichen Straßenführung unter Berücksichtigung einzelner Fahrmanöver in Betracht gezogen (Ehrenpfordt & Rataj, 2006a). Aus konzeptionellen Gründen der Umsetzbarkeit in einen Routenplaner erfolgt jedoch keine Umsetzung auf Basis allgemeiner Fahrmanöver, wie z.B. „einem Fahrzeug folgen“ oder „ein Fahrzeug überholen“. Es werden ausschließlich notwendige Abbiegemanöver in das Konzept einbezogen.

Untersuchungen der Belastung von Autofahrern auf Manöverebene wurden beispielsweise von Vollrath et al. (2005) durchgeführt.

Der Sicherheitsgewinn bei einer individualisierten Routenplanung erfolgt durch eine grundlegende Vermeidung von Situationen mit einem individuell sicherheitskritischen Potential. Im optimalen Fall kommen die auf der Führungs- und Stabilisierungsebene beruhenden Assistenzsysteme daher nicht mehr oder sehr selten zum Einsatz, da entsprechende Situationen bereits auf der Navigationsebene durch eine entsprechende Routenplanung umfahren werden (Ehrenpfordt & Rataj, 2006b).

Ein weiteres Potential des neuartigen Assistenzsystems ergibt sich aus der Überlegung, individuell problematische Situationen dem Fahrer als Training anzubieten. Dabei muss allerdings eine erste Einstufung und eine Steigerung des Schwierigkeitsgrades auf die Person abgestimmt werden. Einen sinnvollen Einsatz findet ein solches System bei Fahranfängern im PKW- oder LKW-Bereich oder bei Personen, welche nach einer längeren Fahrpause wieder Kraftfahrzeuge führen wollen (Ehrenpfordt & Eggert, 2007).

1.3 Zielsetzung der Arbeit

Die dieser Arbeit zugrundeliegende Idee der Nutzung der Navigationsebene für die Entwicklung eines neuartigen Fahrerassistenzsystems wurde im vorherigen Kapitel bereits angeführt. Dazu ist ein Konzept zu erstellen, wie eine personalisierte Routenplanung auf Basis infrastrukturel induzierter Belastungen realisiert werden kann.

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit lässt sich damit folgendermaßen umreißen:

- Zunächst sind die Ausgangssituation und der Stand der Technik inklusive der Grundlagen der Navigation darzulegen.
- Des Weiteren müssen die potentiellen Nutzergruppen identifiziert werden, welche von einer individualisierten Routenplanung profitieren können. Dabei sollen unterschiedliche Gesichtspunkte für eine Gruppenbildung herangezogen werden.

- Anschließend müssen die Eigenschaften der Nutzer identifiziert werden, welche eine Zuordnung der Nutzer zu den Gruppen ermöglichen. Hierbei ist auf eine ausreichende Differenzierbarkeit durch die einzelnen Eigenschaften zu achten.
- Die Grundlagen und Verfahren zur Messung von Beanspruchung sind darzulegen. Anschließend soll ein Maß der Beanspruchungsmessung ausgewählt werden, welches für eine Umsetzung am besten geeignet ist.
- Ein Konzept ist zu entwickeln, wie die Daten in eine Routenplanung eingebunden werden können. Anhand des Konzeptes soll anschließend die Umsetzung erfolgen. Dabei ist die Datenaufbereitung zu optimieren.
- Zur Sicherung der Datenqualität sind Prüfmethoden zu entwickeln und in die Datenaufbereitung einzubauen. Sie sollen außerdem zu einer Steigerung der Akzeptanz des Systems durch den Nutzer beitragen.

Abschließend soll anhand einer Versuchspersonenstichprobe die Funktionalität des umgesetzten Konzeptes der individualisierten Routenplanungen gezeigt werden. Die sich nach der Durchführung ergebenden, zukünftigen Entwicklungspotentiale sind darzulegen.

2 Grundlagen der Navigation

Im allgemeinen Sprachgebrauch wird als Navigation das sich Zurechtfinden in einem geographischen Raum incl. der Erreichung des gewünschten Zielortes bezeichnet. Daraus ergibt sich eine grundlegende Gliederung der Aufgabe *Navigation* in die drei Teilbereiche:

- Ortsbestimmung
- Routenberechnung
- Zielführung

Die ursprüngliche Entwicklung der Navigation erfolgte vor ungefähr 6000 Jahren in Ägypten, Indien und dem Gebiet des heutigen Libanon im Bereich der Seeschifffahrt. Die Seefahrer entwickelten eine einfache Koppel- und Astronavigation zur Überbrückung großer Entfernungen, um auch außerhalb der Küstensichtweite operieren zu können (Hertel, 1990). Dieses Verfahren wurde ab ca. dem ersten Jahrtausend vor Christus auch auf dem Land eingesetzt, um primär Wüsten oder andere Gebiete ohne eindeutige Landmarken durchqueren zu können (Freiesleben, 1978).

Mit Aufkommen der Luftfahrt wurde die Etablierung einer passenden Navigationsmethodik notwendig, da Landmarken aufgrund unspezifischer Topografie fehlen oder durch schlechte Sichtbedingungen nicht erkannt und genutzt werden konnten. Dunst und Nebel sowie Flüge über einer geschlossenen Wolkendecke schließen die Nutzung der bodenseitigen Landmarken aus. Eine neuartige Weise der Navigation war notwendig geworden, um unabhängig von diesen unzulänglichen Orientierungspunkten zu werden.

Im Folgenden sind die gängigen Verfahren der Navigation mit einer kurzen Beschreibung der zugrundeliegenden Ortungsmethodik angeführt.

Bei der **Terrestrischen Navigation** erfolgt die Orientierung an bestehenden oder künstlichen Landmarken. Dadurch können Rückschlüsse auf den eigenen Standort und die Bewegungsrichtung gezogen werden.

Erfolgt die Standortbestimmung auf dem Vergleich zwischen einer Karte und dem umgebenden Gelände, so bezeichnet man dies als **Sichtnavigation**. Grundlage für dieses Verfahren ist das Vorhandensein eines entsprechend genauen Kartenmaterials. Das Verfahren gehört beispielsweise zu den Grundlagen der Ausbildung von Privatpiloten.

Die Messung von Richtungen und Höhen bestimmter Himmelskörper in Bezug auf die Erde, wie der Sonne, von Planeten oder Fixsternen, wird als **Astronomische Navigation** bezeichnet. Diese wurde früher vor allem in der Seefahrt angewandt, wobei entsprechende Instrumente, die Sextanten, zum Einsatz kamen.

Die **Koppelnavigation** nutzt zur Positionierung Kurs und Geschwindigkeit des Verkehrsträgers. Als Rückfallebene erfolgt außerdem ein Abgleich der rein rechnerischen Ortsbestim-

mung mit markanten Punkten auf der Strecke. Störeinflüsse, wie beispielsweise eine Windabdrift in der Luft- und Seefahrt, können bestimmt und berücksichtigt werden.

Ein künstlich aufgebautes Referenzsystem aus Sendestationen bildet die Grundlage für die **Funknavigation**. Über codierte Funkwellen und deren Verrechnung kann die aktuelle Position errechnet werden. Eine Unterscheidung der Anwendungen nach raumseitigen oder bodenseitigen Systemen ist möglich. Eine spezielle Form eines solchen, künstlichen Bezugssystems unter Einbezug von Satelliten ist Grundlage der **Satellitennavigation**. Zu den Global Navigation Satellite Systems (GNSS) gehören GPS, GLONASS und das im Aufbau befindliche europäische GNSS Galileo. Über Signallaufzeitmessungen und eine Auswertung der Phasenunterschiede der zugrundeliegenden Trägerwellen erfolgt die Standortbestimmung (Bauer, 2003).

Kreiselinstrumente und Beschleunigungsmesser liefern die Datengrundlage bei der **Trägheitsnavigation**. Das autonome Verfahren benötigt allerdings zwingend die Kenntnis der Ausgangsposition, da es nur zur Bestimmung relativer Positionen und nicht zur absoluten Positionierung in einem Bezugssystem fähig ist.

Werden mehrere Navigationsverfahren kombiniert, spricht man von **Integrierter Navigation** oder **Hybridnavigation**. Diese erfolgt zur Steigerung der Genauigkeit und zur Angabe der Integrität der Positionslösung. Die unterschiedlichen Datenqualitäten, resultierend aus den beteiligten Verfahren, gehen im Rahmen einer Gewichtung ein.

Notwendig gehört zur Nutzung der unterschiedlichen Navigationsverfahren die Definition eines entsprechenden Bezugssystems. Dieses Referenzsystem muss eine räumliche Orientierung und entsprechende Maßeinheiten besitzen. Nur in Bezug auf das festgelegte Referenzsystem kann die Durchführung einer Navigationsaufgabe erfolgen. Sind Start-, Ziel oder Zwischenpunkte nur in Bezug auf unterschiedliche Referenzsysteme bekannt, muss mittels einer Transformation der Wechsel zwischen den Bezugssystemen durchgeführt werden.

Die zur Bestimmung des Ortsbezuges aktuell angewendeten Verfahren, die von ihnen gelieferten Daten sowie die darauf basierenden grundlegenden Routenplanungsalgorithmen werden in den folgenden Kapiteln angeführt.

2.1 Ortsbestimmung

Die Bestimmung des aktuellen Standortes stellt eine sehr wichtige Größe bei der Routenberechnung und der Zielführung dar. In diesem Kapitel sollen daher die grundlegenden Verfahren mit Ihren Eigenschaften vorgestellt werden. Aus den Eigenschaften lassen sich die Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren ableiten.

Derzeit finden hauptsächlich Verfahren Anwendung, welche sich auf die Laufzeitmessung codierter Datenströme, die Messung von Phasenverschiebungen oder die Signalstärkemessung der zugrundeliegenden Trägerwelle beziehen.

Bildbasierte Triangulationsverfahren sind bislang nur bedingt echtzeitfähig, wobei an einer Optimierung und Realisierung in nahezu Echtzeit geforscht wird.

2.1.1 Global Positioning System (GPS)

Das Global Positioning System (GPS) wurde originär vom amerikanischen Department of Defence (DoD) entwickelt und aufgebaut, um zu jedem Zeitpunkt eine weltweite Ortsbestimmung zu ermöglichen. Später wurde das System auch für die zivile Nutzung freigegeben, allerdings mit einer eingeschränkten Genauigkeit der Ortsbestimmung, diese wurde künstlich verschlechtert.

Zurzeit basiert das GPS auf 29 funktionsfähigen Satelliten auf sechs Bahnebenen mit einer Inklination von 55° . Aufgrund der Anziehungs- und der Fliehkräfte ergibt sich die Umlaufzeit aus der Entfernung zwischen Erde und Satelliten. Da das System so konzipiert ist, dass jeder Satellit pro siderischen Tag zwei Umlaufzeiten vollzieht, ergibt sich eine Flughöhe von ca. 20180km. Vier Bodenstationen kontrollieren die Satelliten und von einer der Bodenstationen aus erfolgt die Steuerung der Satelliten (Bauer, 2003).

Das System verwendet gegenüber der koordinierten Weltzeit UTC (Universal Time Coordinated) ein eigenes Zeitsystem, bei welchem die Schaltsekunden keine Berücksichtigung finden. Daraus resultiert im Frühjahr 2009 ein Versatz um 15 Sekunden, wobei das GPS im Vergleich vor geht. Mit jeder Schaltsekunde in der UTC erhöht sich dieser Versatz.

Neben der üblichen Positionsbestimmung aus Laufzeitmessungen kann auch eine Ortsbestimmung aufgrund von Phasenverschiebungen berechnet werden. Beim GPS wird auf den beiden Frequenzen L1 (1575,42 MHz) und L2 (1227,6 MHz) ein phasenmoduliertes Signal von den Satelliten ausgesendet. Zur Unterscheidung sendet jeder Satellit ein weiteres phasenmoduliertes Signal, den Pseudo-Random-Noise (PRN). Die Navigationsinformationen werden über eine zusätzliche Modulation dem Signal aufgeprägt. Dabei gibt es eine Verschlüsselung, welche zivil nutzbar ist (C/A-Code) und eine Verschlüsselung, welche vom amerikanischen Militär entschlüsselt werden kann (P-Code). Jeder Satellit besitzt eine eigene Verschlüsselungsvorschrift sowohl für C/A-Code, als auch für P-Code, so dass jeder Satellit eindeutig identifizierbar ist und gemeinsame Trägerfrequenzen genutzt werden können. Dieser Vorgang wird als Code-Multiplex-Verfahren (CDMA) bezeichnet.

Die Sendung des C/A-Codes erfolgt nur auf der L1-Frequenz, während dem Militär mittels P-Code beide Frequenzen zur Verfügung stehen. Hierüber wird unter anderem auch die Genauigkeit der in Echtzeit verfügbaren Positionierungslösungen beeinflusst.

Die Lagekoordinatenangaben im GPS beziehen sich auf das World Geodetic System aus dem Jahr 1984 (WGS84), wobei die Höhe in Bezug auf das Referenzellipsoid und nicht auf das Geoid bezogen ist.

2.1.2 Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikova Sistema (GLONASS)

Dieses seit 1983 im Aufbau befindliche, russische System bildet ein Pendant zum amerikanischen GPS, wobei es bislang nur temporär betriebsbereit war. Die politische Priorität hat sich jedoch in den letzten Jahren geändert, so dass GLONASS mittels neuer, finanzieller Unterstützung innerhalb der nächsten Jahre bis 2010 vollständig betriebsbereit sein soll. Dabei sind lediglich 24 Satelliten auf Umlaufbahnen mit einer Inklination von $64,8^\circ$ vorgesehen. Diese

Konstellation ermöglicht eine bessere Sichtbarkeit der Satelliten in den nördlichen Breiten bis ca. 75° gegenüber dem GPS. Aufgrund des geringeren Abstandes von etwa 19140 km erfolgt ein Umlauf in 8/17 eines siderischen Tages (Mansfeld, 2004 und Bauer, 2003).

Die Satellitenkanäle werden bei GLONASS über eine Verwendung unterschiedlicher Frequenzen separiert. Für die Informationsverschlüsselung wird nur eine Signalmodulation verwendet. Die Übertragung findet in den beiden Frequenzbereichen L1 (1602 MHz) und L2 (1246 MHz) statt.

Die Besonderheit liegt darin, dass jeder Satellit seine eigene Ausstrahlungsfrequenz besitzt. Diese wird ausgehend von den Grundfrequenzen L1 bzw. L2 berechnet. Aufgrund möglicher Störungen durch andere Funksysteme wurde die Anzahl auf 12 Frequenzen eingeschränkt. Eine gegenseitige Störung innerhalb des Systems wird dahingehend ausgeschlossen, dass sich in Bezug auf die Erde gegenüberliegende Satelliten dieselbe Frequenz teilen.

Als geodätisches Bezugssystem nutzt GLONASS das PZ90, welches dem WGS84 sehr ähnlich ist, jedoch auf das Gebiet der ehemaligen UdSSR besser angepasst wurde. Als Bezugszeit dient ein russischer Zeitbezug, welcher zu einem Versatz zwischen dem System und der UTC führt.

Aufgrund der unterschiedlichen Zeitbasen von GPS und GLONASS kann eine Kombination nur erfolgen, wenn ein zusätzlicher Satellit für die Bestimmung der Zeitkomponente zur Verfügung steht. Einige Empfänger bieten bereits die Kombinationsmöglichkeit beider GNSS.

2.1.3 Europäisches GNSS Galileo

Die Europäische Union hat sich auf die Errichtung eines eigenen Satellitenpositionierungssystems geeinigt, welches im Gegensatz zum GPS Angaben über die Integrität der Positionierungslösung angibt. Als weiteres Novum gegenüber dem GPS gilt die Gewährleistung der Systemverfügbarkeit. Die erzielbaren Genauigkeiten des Systems sollen außerdem aufgrund seiner Auslegung höher als die des GPS sein.

Das GNSS wurde unter dem Namen Galileo entwickelt. Seit 2006 ist die Namensgebung umstritten. Dabei geht es um einen Markenrechtsstreit des englischen Unternehmens Galileo International Technology LLC gegen die deutsche Firma Galileo Industries GmbH (Heise Online, 2007). Im Folgenden wird daher der Begriff europäisches GNSS Galileo verwendet.

Im Gegensatz zu dem amerikanischen GPS und dem russischen GLONASS handelt es sich hierbei um ein grundlegend ziviles Projekt. Der Aufbau der notwendigen Infrastruktur gliedert sich in drei Phasen: Entwicklung und erste Validation (2003 – 2009), Systemaufbau (2010 – 2012) und operativer Betrieb (ab 2012).

Das System gliedert sich außerdem in drei Bereiche: Raumsegment, Bodensegment und Nutzersegment (Mansfeld, 2004). Das **Raumsegment** besteht aus 30 Satelliten, welche sich auf einer Umlaufbahn mit einer Inklination von 56° befinden, um eine bessere Sichtbarkeit im europäischen Gebiet zu erlangen. Aufgrund der Flughöhe von ca. 23.600 km dauert ein Umlauf 14 Stunden. Von den 30 Satelliten werden nur 27 aktiv genutzt, während die anderen

drei als Reserve vorgehalten werden. Bei der Satellitenkonstellation des europäischen GNSS handelt es sich um eine sogenannte Walker-27/3/1 Konstellation, da sich die 27 Satelliten auf drei Bahnebenen verteilen. Zwei benachbarte Satelliten besitzen aufgrund dessen einen Phasenwinkel von $13,3^\circ$. Als Resultat dieser Konstellation werden in Europa immer 5-6 Satelliten zur Positionsbestimmung verfügbar sein.

Vom europäischen GNSS wird neben den Frequenzen E5 (1191,795MHz) und E6 (1278,75 MHz) ebenfalls die L1-Frequenz genutzt, welche sich beim GPS im Einsatz befindet. Die Daten werden dabei mit dem Verfahren der Binary Offset Carrier Modulation (BOC) aufmoduliert.

Die Kontrolle der Satelliten erfolgt vom **Bodensegment** aus, welches aus mehreren europäischen und nichteuropäischen Beobachtungsstationen besteht. Diese Beobachtungsstationen zählen zu den regionalen Komponenten, welche individuelle Schwerpunkte bilden können. Nach vollständigem Ausbau des europäischen GNSS sollen fünf Services im Bereich des **Nutzersegments** angeboten werden.

2.1.4 Genauigkeitssteigerung mittels Korrekturdaten

Um eine höhere Genauigkeit der Positionierungslösungen eines GNSS zu erhalten, können Korrekturdaten in die Berechnung einbezogen werden. Bei diesem Verfahren werden an einem Ort, welcher mit hoher Genauigkeit bekannt ist, die Abweichungen der aktuellen Positionierungslösung berechnet und entweder in Echtzeit oder mit zeitlichem Versatz an potentielle Nutzer weitergeleitet. Dabei muss sich der Bezugspunkt in der Nähe des Nutzers und seines Systems befinden, da die Ungenauigkeiten örtlich variieren. Bei der Echtzeitdatenübermittlung unterscheidet man grundsätzlich eine boden- bzw. eine raumgestützte Korrekturdatenübermittlung.

Bei den **bodengestützten Systemen** erfolgt die Weiterleitung der ermittelten Korrekturdaten an den Nutzer mittels Mobiltelefon oder Funk. In Deutschland gibt es den Sapos-Dienst der Landesvermessungsämter für die Korrektur von GPS-Daten und den Ascos-Dienst, welcher zusätzliche Korrekturen über die Auswertung von GLONASS-Daten einbezieht und ausstrahlt (Bauer, 2003).

Die **satellitengestützten Systeme** nutzen zumeist geostationäre Satelliten, welche die am Boden berechneten Korrekturdaten ausstrahlen. Im Folgenden ist eine Auswahl der bekannten Systeme angeführt:

- WAAS - Wide Area Augmentation System für GPS in Amerika
- EGNOS - European Geostationary Navigation Overlay System in Europa
- GAGAN - GPS Aided Geo Augmented Navigation in Indien, welches auf der gleichen Technologie wie WAAS arbeitet
- MSAS - MTSat Space based Augmentation System in Japan, ebenfalls aufbauend auf WAAS-Technologie
- OmniSTAR – im weltweiten Einsatz

2.1.5 GSM- und UMTS-basierte Ortungsverfahren

Zur Ortsbestimmung kommen mittlerweile nicht mehr nur die dafür originär entwickelten Systeme zum Einsatz. Die Eigenschaften anderer Systeme werden mittlerweile ebenfalls genutzt, um eine Positionierungslösung zu erhalten (Ziegert, 2000).

Das *Global System for Mobile Communication* (GSM) wurde originär zur drahtlosen Übertragung von mobilen Telefongesprächen aufgebaut. In den beiden Frequenzbereichen 900 MHz (D-Netze) und 1,8 GHz (E-Netze) wird das Modulationsverfahren *Time Division Multiple Access* (TDMA) eingesetzt. Dabei erfolgt die Datenübertragung in bestimmten Zeitschlitzten (Eberspächer et al., 2000).

Die neuere Entwicklung des *Universal Mobile Telecommunication System* (UMTS) knüpft an die Errichtung des GSM an. Allerdings steht hierbei die drahtlose Übertragung großer Datenmengen im Vordergrund. Die Modulation erfolgt bei UMTS mittels *Code Division Multiple Access* (CDMA). Die Verbindungen werden über entsprechende Codes unterschieden. Die Anzahl der Nutzer in einer Zelle ist daher nicht primär begrenzt. Da sich alle Teilnehmer dieselbe Datenübertragungsbreite teilen, wird die Kapazität jedes Nutzers mit steigender Anzahl an Teilnehmern in einer Zelle verringert. Unter Umständen werden Nutzer aufgrund der Kapazitätsoptimierung automatisch an benachbarte Sender weitergeleitet. Genutzt werden die Frequenzen von 1.9 GHz bis 2.2 GHz (Ziegert, 2000).

Im Folgenden ist angeführt, welche Möglichkeiten die Kommunikationsnetze aufgrund ihres Betriebes bieten. Dabei sind mehrere Ansätze zu unterscheiden:

Zellenortung

Jedes Mobilfunkgerät muss sich zum Betrieb in einem Netzwerk anmelden. Zur Durchführung von Gesprächen oder einer Datenübermittlung erfolgt der Verbindungsaufbau zu der Zelle mit der besten Empfangsqualität. Da alle Zellen in einem Funknetz eine feste Position besitzen, lässt sich der Standort eines Mobilfunkgerätes auf diese Weise lokalisieren. Die erzielbare Genauigkeit ist abhängig von der Ausdehnung der Zelle. Während im innerstädtischen Bereich Zellen mit einer Ausdehnung von wenigen 100 Metern Durchmesser zu finden sind, gibt es in ländlichen Bereichen üblicherweise Zellen mit mehreren Kilometern Durchmesser. Des Weiteren können die Randbereiche der Zellen aufgrund von Witterung oder des Auslastungsgrads geringfügig variieren.

Timing Advance

Zur Verbesserung der Sprachqualität wird bei den GSM-Netzen die Signallaufzeit zwischen Mobilfunkgerät und Sendeanlage berücksichtigt, wenn ein Gespräch stattfindet. Beim Timing Advanced-Wert (TA) handelt es sich um eine 6-Bit-Information, mit welcher die Entfernung zwischen beiden codiert ist. In konzentrischen Abständen von jeweils ca. 550 Metern um die Sendeanlage erfolgt die Einteilung in entsprechende Bereiche. Nutzt man die Zellortung in Kombination mit dem TA-Wert, kann der Aufenthaltsbereich eines aktiven Mobilfunkgerätes genauer bestimmt werden.

Measurement Report

Für die Zuordnung eines aktiven Mobiltelefons zu einer *Base Transceiver Station* (BTS) werden die Empfangsfeldstärken der sieben stärksten Sender im Mobilfunkgerät gemessen und im Verbindungsmodus ca. alle 480 Millisekunden an die aktuelle BTS übermittelt. Diese Informationen bezeichnet man als *Measurement Reports* (MR). Verändern sich die Empfangsfeldstärken, wird dann ein Wechsel zur jeweils am stärksten empfangenen BTS eingeleitet (Heine, 2001).

Die Measurement Reports können zur Positionsbestimmung genutzt werden, da an bestimmten geografischen Orten eine ganz bestimmte Konstellation von empfangenen BTS incl. charakteristischer Empfangsfeldstärken vorliegt. Dieses Verfahren wurde zum Beispiel im Projekt „Traffic Online – Online Verkehrsdatenerfassung über Mobilfunkdaten“ eingesetzt, welches vom BMBF, später vom BMWi, gefördert wurde (BMBF, 2004).

Neben den passiven Verfahren, bei denen Daten aus dem laufenden Betrieb des GSM-Netzes verwendet werden, kann auch eine aktive Datenverbindung von der Netzseite her aufgebaut werden. Darüber werden ebenfalls Standortdaten des Mobilfunkgerätes nutzbar. Ein solches Vorgehen bedarf bislang einer richterlichen Zustimmung und wird nur zur Aufdeckung von Straftaten angewendet.

2.1.6 WLAN-Ausbreitung zur Positionsbestimmung

Im Zuge des technischen Fortschritts hat die drahtlose Übertragung von Daten zwischen Informationsnetzwerken wie dem Internet und Endgeräten immer mehr an Bedeutung gewonnen. Der Vorteil eines Informationsaustausches, ohne die Abhängigkeit einer festen, physikalischen Verbindung, führt auch besonders im privaten Bereich zu einer steigenden Verbreitung dieser Technik.

Wie schon bei den GSM-Netzen, handelt es sich beim *Wireless Location Area Network* (WLAN) um einen Informationsaustausch auf Funkwellenbasis. Hierbei kommen andere Techniken und Frequenzbereiche zum Einsatz, so dass nicht alle Positionierungsverfahren in Analogie zum GSM-Bereich übernommen werden können. Es kommt zum Beispiel die Auswertung der Signalfeldstärke zur Anwendung.

Die Reichweite liegt beim WLAN deutlich unter der eines GSM-Netzes. Mit wenigen 100 Metern in freiem Gelände und noch deutlich geringerer Reichweite innerhalb von Gebäuden, kann nur eine lokal eingeschränkte Position bestimmt werden. Die Grundlage des WLAN findet sich in den Normen der IEEE 802.11a/b/g (Sauter, 2006).

2.1.7 Bildbasierte Positionsbestimmung

Auch über die Auswertung von Videobildern kann eine Ortsbestimmung erfolgen. Dazu müssen innere und äußere Orientierung der Kamera sehr genau bekannt sein. Bei dynamischen Systemen ist eine Echtzeitlokalisierung von Objekten und die eigene Positionsbestimmung sehr aufwendig, weshalb bildbasierte Verfahren zur Positionsbestimmung zumeist nur bei Offline-Auswertungen einen Einsatz finden. Einschlägige Forschungen der Eigenortung mittels

bildbasierter Verfahren werden beispielsweise anhand bekannter Objekte im Bezugssystem durchgeführt (Kais et al., 2004).

2.2 Routengenerierung

Die Entwicklung von Algorithmen zur Bestimmung von Routen war geprägt durch die anfängliche Limitierung der Rechenleistung von Computern. Die Einschränkung der Anzahl an möglichen Rechenoperationen führte zunächst zu einer stetigen Optimierung der Verfahren, um eine zeitnahe Durchführung der Routenkalkulation abschließen zu können. Die Grundlage für diese Algorithmenentwicklung bildet die allgemeine Graphentheorie, welche im Folgenden kurz erläutert wird.

2.2.1 Graphentheorie

Die Problemstellung der Routensuche und -generierung erfordert eine mathematische Modellierung des zugrundeliegenden Netzwerks. Hierbei hilft die Datenstruktur der Graphentheorie (Pape, 1971, Braun, 1980). Ein Graph besteht aus einer Menge an Knoten, welche mittels Kanten miteinander verbunden sind.

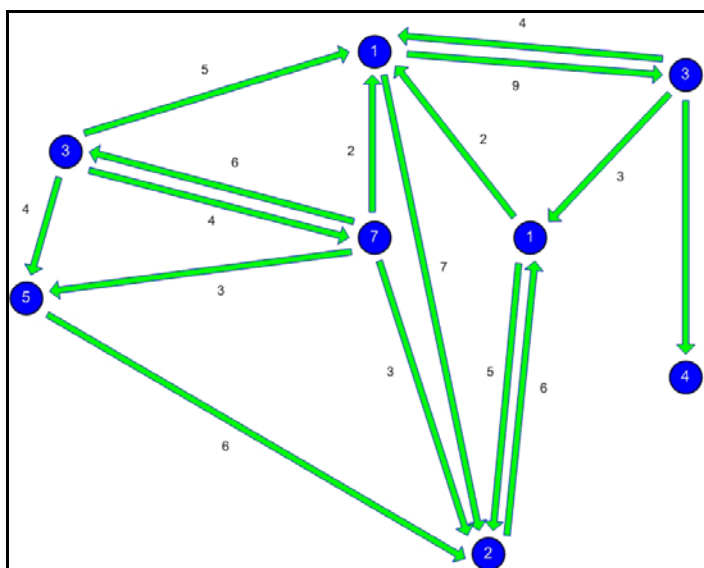


Abbildung 10: Beispiel eines gerichteten, knoten- und kantenbewerteten Graphen

Grundlegend erfolgt eine Unterscheidung zwischen gerichteten und ungerichteten Graphen. Bei **ungerichteten Graphen** gibt es zwischen zwei Knoten nur eine bidirektionale Verbindung und ggf. eine zugehörige Gewichtung.

Gerichtete Graphen unterscheiden sich von ungerichteten dadurch, dass die Kanten eine spezielle Richtung aufweisen. Eine bidirektionale Verbindung zweier Knoten erfordert demnach zwei Kanten, welche unterschiedliche Gewichtungen besitzen können.

Graphen werden als kantenbewertet bezeichnet, wenn sie eine Gewichtung (z.B. Streckenlänge) besitzen. Sie werden knotenbewertet genannt, wenn die Gewichtung an den Knoten

angebracht wurde (z.B. Dauer des Durchfahrens einer Kreuzung). Eine Kombination beider Gewichtungen ist möglich, wie in Abbildung 10 dargestellt.

Für die Routensuche wird im Allgemeinen ein kantenbewerteter, gerichteter Graph (engl. Digraph = directed graph) verwendet. Die Kanten besitzen eine oder zwei Ausrichtungen mit den zugehörigen, richtungsabhängigen Gewichten. Ein gerichteter Graph wird außerdem als stark zusammenhängend bezeichnet, wenn zwischen je zwei Knoten ein Weg vorhanden ist. Existieren zwischen allen Knoten eines Graphen Kanten, so heißt der Graph vollständig.

Auf der Graphentheorie basieren im Allgemeinen die Algorithmen zur Routensuche. Welche Aspekte zu einer Gewichtung von Kanten und Knoten führen, wird im Folgenden erläutert.

2.2.2 Algorithmen zur Routenberechnung

Die Routenberechnung zwischen zwei Orten ist im Allgemeinen mit einem mehr oder minder großen Rechenaufwand verbunden. Hinsichtlich der Rechenleistung und des Speicherbedarfs erschien es in den Anfängen der neuzeitlichen Navigationsberechnungen ineffizient, wenn nicht gar unmöglich, alle theoretisch vorhandenen Wege zu ermitteln, und anschließend aus diesen den kürzesten herauszusuchen. Daher mussten entsprechend intelligente Algorithmen für die Problemlösung entwickelt werden. Ist deren Ablauf optimal, können viele Rechenoperationen entfallen, ohne dass das Ergebnis in seiner Qualität maßgeblich gemindert wird. Die Algorithmen zur Wegfindung lassen sich in verschiedene Kategorien einteilen:

- Single Source Shortest Path (SSSP)
- Single Destination Shortest Path (SDSP)
- Single Pair Shortest Path (SPSP)
- All Pairs Shortest Path (APSP)

Die **Single Source Shortest Path Algorithmen** berechnen, ausgehend von einem Startpunkt, die kürzesten Wege zu allen anderen Punkten im zugrundeliegenden Netz.

Bei den **Single Destination Shortest Path Algorithmen** erfolgt die Berechnung, im Gegensatz zum Single Source Shortest Path Algorithmus, rückwärts vom Ziel zum Startknoten.

Bei der Lösung von **Single Pair Shortest Path** Problemen kommen mehrere Single Source Shortest Path Algorithmen zur Anwendung. Ein Abbruch der Berechnungen erfolgt jedoch bereits, wenn das Ziel erreicht wurde, bevor die Wege zu allen anderen Knoten bestimmt wurden.

All Pairs Shortest Path Algorithmen berechnen eine Quelle-Ziel-Matrix, in welcher die kürzesten Verbindungen zwischen allen Paaren von Punkten aufgeführt sind. Eine praktische Abhandlung dazu ist bei Murchland (1971) zu finden.

Zur Bestimmung des kürzesten Pfades in einem Straßennetz kommen im Allgemeinen Single Pair Shortest Path Algorithmen zur Anwendung, da für den Verkehrsteilnehmer nur die eine, kürzeste Verbindung zwischen zwei Orten von Bedeutung ist.

Zur Bestimmung der nächstgelegenen Ausflugsziele in der Umgebung eines Standortes kommen beispielsweise die Single Source Shortest Path Algorithmen zur Anwendung (Kühnel et al., 2002; Gritzmann & Brandenburg, 2002).

Wie eine Umsetzung der grundlegenden Algorithmen durchgeführt wurde, ist den folgenden Kapiteln zu entnehmen. Hierzu siehe auch Pape, welcher gute Beispiele anführt (Pape, 1971). Mit welchen grundlegenden Problemen eine Umsetzung verbunden sein kann, zeigen Ribbeck (1971), Reichenbach (1979) und Schmid (2001).

Dijkstra und Derivate

Der Algorithmus von Dijkstra gehört zu den Single Source Shortest Path Algorithmen und dient der Ermittlung des kürzesten Weges zwischen einem Start- und einem Zielknoten in einem Graphen. (Dijkstra, 1959; Gritzmann & Brandenburg, 2002). Voraussetzung für die Anwendbarkeit ist, dass der Graph keine negativen Kantengewichte aufweist, also als positiv bezeichnet wird. Es können sowohl gerichtete als auch ungerichtete Graphen die Grundlage bilden. Wenn der Graph nicht stark zusammenhängend und vollständig ist, also nicht alle Knoten vom Startknoten aus erreichbar sind, werden die Entfernungen zu diesen Knoten als unendlich angesehen.

Zunächst wird der Startknoten mit „0“ bewertet. Anschließend werden die möglichen Nachfolgeknoten des Startknotens ermittelt und bewertet. Als Optimierungskriterium wird im Folgenden von so genannten Kosten gesprochen. Hierdurch wird die Unabhängigkeit des Verfahrens von den Eingangsgrößen Zeit, Entfernung oder ähnlichem ausgedrückt. Die Kosten der Nachfolgeknoten werden als Summe der Kosten des Vorgängerknotens (im Falle des Startknotens „0“) und dem Gewicht der jeweiligen Verbindungskante berechnet.

Diese Kosten werden in die Liste der noch abzuarbeitenden Knoten eingetragen. Im nächsten Schritt wird der noch offene Knoten betrachtet, der die geringsten Kosten aufweist. Die von diesem Knoten aus erreichbaren Knoten werden nach obigem Schema bewertet. Vor dem Einfügen dieser Knoten in die Liste der noch abzuarbeitenden Knoten ist jedoch zu untersuchen, ob diese bereits in der Liste eingetragen sind und, falls ja, ob zu diesen Knoten ein Weg mit geringeren Kosten gefunden wurde. Trifft beides zu, so ist die Bewertung des Knotens in der Liste zu aktualisieren. Ist der neu gefundene Weg zu einem bereits existierenden Knoten mit mehr Kosten verbunden, ist dieser zu verwerfen. Diese Schritte sind so lange zu wiederholen, bis entweder die Liste der noch offenen Knoten leer ist, oder der zu untersuchende Knoten mit dem Zielknoten übereinstimmt. Eine entsprechende Ausführung in Pseudocode ist dem Anhang A zu entnehmen.

Bei dem **Best First Search Algorithmus** handelt es sich um einen Suchalgorithmus, der eine Heuristik einbezieht, d.h., dass die Suche aufgrund einer Abschätzung zum Zielpunkt in diese Richtung beeinflusst wird. Prinzipiell entspricht der Algorithmus dem Dijkstra-Algorithmus, abgesehen von der Tatsache, dass die Sortierung der Liste noch offener Knoten nicht von der Länge vom Startpunkt zum momentanen Suchpunkt bestimmt wird, sondern vielmehr von

der Abschätzung des Weges vom Such- zum Zielpunkt. Das Problem ist, dass der Weg um ein Hindernis nicht direkt, sondern wellenförmig berechnet wird. Dementsprechend ist der gefundene Weg nicht unbedingt der kürzeste.

Der **A*-Algorithmus** ist ein Derivat des Dijkstra-Algorithmus, welcher von Hart et al. (1968) unter Einbezug des Best-First-Search-Algorithmus (s.o.) aufgestellt wurde. Es gelten hinsichtlich der Anwendbarkeit dieselben Voraussetzungen wie beim originären Algorithmus von Dijkstra. Zur Optimierung der benötigten Rechenzeit wurde der Dijkstra-Algorithmus um eine Heuristik ergänzt.

Der A*-Algorithmus berechnet für ein statisches Netzwerk den kürzesten Weg von einem Start- zu einem Zielknoten. Werden jedoch nach der Berechnung dieses Weges Veränderungen an den Bewertungen einzelner Graphenelemente (Knoten oder Kanten) vorgenommen, können diese nicht mehr berücksichtigt werden. Im Bereich von Straßennetzen können derartige Veränderungen beispielsweise durch das Entstehen oder die Auflösung von Staus auftauchen. Aber auch die durch eine erhöhte Verkehrsdichte verringerte, realisierbare Fahrgeschwindigkeit auf einzelnen Kanten kann eine Veränderung der Kosten des Gesamtweges zur Folge haben, so dass dieser nicht mehr den schnellsten Weg darstellt. Dies führte zur Entwicklung des **D*-Algorithmus**. Anthony Stentz von der Carnegie Mellon University hat 1992 diesen Algorithmus entwickelt, welcher den kürzesten Weg zwischen zwei Knoten auch in dynamischen Netzwerken berechnen kann (Cormen et al., 2004).

Die Algorithmen Dijkstra, A* und D* können hinsichtlich ihrer Laufzeit optimiert werden, indem die Suche nach dem kürzesten Weg nicht nur vom Startknoten aus durchgeführt wird, sondern parallel dazu vom Zielknoten aus. Beide Suchen werden so lange durchgeführt, bis ein zu untersuchender Knoten in der Liste der bereits abgearbeiteten Knoten der jeweils anderen Suche auftaucht (Cormen et al., 2004).

Optimierungen der Routenberechnung

Der **Floyd-Warshall-Algorithmus** dient der Lösung von All Pairs Shortest Path Problemen (APSP) und berechnet somit die kürzesten Wege zwischen allen Knoten eines Graphen. Er liefert kein anderes Ergebnis, als der Dijkstra- oder den A*-Algorithmus, dies jedoch in kürzerer Rechenzeit (Cormen et al., 2004). Am Ende erhält man eine Matrix, in der sich die Kosten der kürzesten Wege zwischen allen Knoten ablesen lassen.

Der Algorithmus von Dijkstra sowie der A*- und der D*-Algorithmus liefern keine sinnvollen Ergebnisse bei der Verwendung von negativen Kantengewichten. Bei der Suche nach dem kürzesten Weg kann der Algorithmus in einer Endlosschleife hängen bleiben. Der **Bellman-Ford-Algorithmus** greift dieses Problem auf. Er bezieht sich auf die Lösung des Single Source Shortest Path Problem (SSSP) und kann im Gegensatz zu den vorgenannten auch Graphen mit negativen Kantengewichten verarbeiten (Cormen et al., 2004). Sowie negative Zyklen auftreten, wird kein kürzester Weg zwischen den zwei Knoten zurückgegeben, sondern eine Fehlermeldung erzeugt. Aufgrund dessen wird der Bellman-Ford-Algorithmus häufig verwendet, um im Vorfeld der Lösung von All Pairs Shortest Path Problemen den Graphen auf negative Zyklen hin zu untersuchen.

Der **Bellman-Moore-Algorithmus** stellte eine Verbesserung des Bellman-Ford-Algorithmus dar, weil nicht sämtliche Kanten des Graphen untersucht werden, sondern nur diejenigen, die Bestandteil einer so genannten Kandidatenliste sind (Cormen et al., 2004).

2.2.3 Datenquellen

Für die vorliegende Arbeit spielt die Datenbasis eine grundlegende Rolle, weil bei der Individualisierung der Routenplanung auf vorhandene Attribute, welche im originären Kartenmaterial vorhanden sind, zurückgegriffen werden muss. Eine Einführung neuer Attribute wird im Zuge dieser Arbeit nicht verfolgt, um das neue Verfahren problemlos und ohne weitere Erhebung von Straßenattributen in beliebige, reale Straßennetzausschnitte portieren zu können.

Ein kurzer Exkurs über Forschungsprojekte und Hersteller ist an dieser Stelle angebracht, um einen Einblick in die Problematik der Kartengenerierung, der Aktualisierung und der Verwendung in Anwendungen zu geben.

Prinzipiell eignen sich unterschiedliche Vektordatenformate für den Datenaustausch. Neben dem nach ISO zur Datenhaltung festgelegten Geographic Data Format (ISO, 2004) werden Straßennetzdaten z.B. auch im Shape-Format der Firma ESRI ausgetauscht. Auf dem weltweiten Markt haben sich zwei Anbieter solcher Straßennetze etabliert: NAVTEQ und Teleatlas.

NAVTEQ

Das 1985 in Silicon Valley (USA) gegründete Unternehmen umfasst mittlerweile 144 Niederlassungen in 60 Ländern der Erde und besitzt einen Mitarbeiterstamm von ca. 2000 Personen. Die Firmenzentrale befindet sich in Chicago (USA); der europäische Hauptsitz der Firma in Veldhofen in den Niederlanden (NAVTEQ, 2007).

Neben der räumlichen Lage und Ausdehnung werden bis zu 204 weitere Attribute erfasst und in einer zugehörigen Datenbank abgelegt. Über Points of Interest (POI) werden Orte wie z.B. Tankstellen, Krankenhäuser und Gaststätten zusätzlich vermarktet. Auf diese Datenbasis können ortsbezogene Dienste, die Location Based Services (LBS), aufgesetzt werden, welche zum zukünftigen Wachstumssegment gezählt werden, da sie dem Nutzer mehr Informationen und Service bieten können.

Der zukünftige Wachstumsmarkt der Fahrerassistenzsysteme (FAS) wird ebenfalls von NAVTEQ adressiert. Hierbei sollen die hochgenauen Karten helfen, den Fahrer bei der Führung seines Fahrzeugs zu unterstützen. Avisiert werden beispielsweise: Adaptive Cruise Control (ACC), Electronic Stability Control (ESC), Lane Departure Warning (LDW), Adaptive Frontlight Systems und Intelligent Speed Advisory (ISA) (NAVTEQ, 2007).

Teleatlas

Der Sitz der niederländisch-belgischen Firma Teleatlas befindet sich in Gent in Belgien. Sie ist der einzige Mitbewerber von NAVTEQ auf dem weltweiten Markt für digitale Straßenkarten, welcher in etwa gleiche Größe und gleiche Verbreitung besitzt. Die Firma wurde 1984, ein Jahr vor NAVTEQ, gegründet und umfasst weltweit mittlerweile ca. 2400 Mitarbeiter (Teleatlas, 2007).

Der Nutzen des digitalen Kartenmaterials als Basis für Fahrerassistenzsysteme wird ebenso wie die Erfassung von Landmarken (POI) und deren Nutzen für ortsbezogene Dienste (LBS) angeführt.

Sowohl Teleatlas als auch NAVTEQ engagieren sich in der europäischen Forschung, unter anderem in den Projekten ActMAP und FeedMAP (Otto et al., 2006), auf die im Folgenden eingegangen werden soll.

2.2.4 Dynamisierte Routengenerierung

Die bislang angeführten Umstände und Ansätze ermöglichen eine Routenplanung auf Basis des zugrundeliegenden Kartenmaterials. Eine solche Routengenerierung wird als statisch bezeichnet. Im Gegensatz dazu wird bei der dynamischen Routengenerierung der aktuelle Verkehrszustand im Straßennetz mit in die Kalkulation einbezogen. Bei der Berechnung der schnellsten Verbindung zwischen zwei Orten kann es vorkommen, dass die statisch am schnellsten befahrbare Verbindung aufgrund widriger Verkehrszustände nun nicht mehr die schnellste Route darstellt.

Im Allgemeinen werden Verkehrsflussstörungen im Straßenverkehr bei diesem Verfahren zuerst an eine zentrale Einrichtung, zumeist Verkehrsmanagementzentralen (VMZ), übermittelt und dort gesammelt. Die an diese Meldestelle angebundenen Rundfunkstationen strahlen die Informationen als Dienst über Ihren Sendekanal aus.

In den folgenden Kapiteln erfolgt ein kurzer Abriss über die Historie der Übertragung von Verkehrsinformationen. Er bietet einen Einblick in den Aufwand der betrieben wurden um Staus zu vermeiden und darüber auch die Verkehrssicherheit zu erhöhen, welches unter anderem durch die Übertragung von Gefahrenwarnungen realisiert wird.

ARI, RDS und TMC

Die **Autofahrer-Rundfunk-Information** (ARI) wurde 1974 eingeführt, um die Versorgung mit Verkehrsinformationen zu verbessern. Dabei wurde mittels Frequenzmodulation codiert, ob der Sender grundsätzlich Verkehrsinformationen ausstrahlt.

Das bereits in den 80er Jahren von der Europäischen Rundfunkunion (EBU) konzipierte **Radio Data System** (RDS) wurde am 1. März 1988, gleichzeitig mit dem ARI, eingeführt. RDS ist grundlegend in der DIN EN50067 spezifiziert.

Der **Traffic Message Channel** (TMC) ist ein eigens eingerichteter Dienst, mit dem Verkehrsmeldungen auf UKW in digitaler Form europaweit ausgestrahlt werden. Damit die Datenmenge in einem ständig wiederkehrenden Rhythmus ausgestrahlt werden kann, erfolgt eine Komprimierung der Informationen. Eine Übertragungsrate von 60-100 bit/s ermöglicht die Ausstrahlung von ca. 10 Meldungen pro Minute. Die Geocodierung der Verkehrsinformationen kann seit 1991 mittels Alert-C erfolgen, welche in der Norm ENV 12313-1 vom CEN spezifiziert ist. Ohne diese Technik ist die Anzahl an fest definierten Orten im RDS/TMC zum Zeitpunkt der Niederschrift dieser Arbeit auf ca. 65.000 Orte begrenzt.

Die ausgestrahlten TMC-Informationen werden außer von den Radioempfängern auch von speziellen Navigationssystemen empfangen und ausgewertet. Dann spricht man von einer dynamischen Routenplanung.

2.2.5 Datenformate TPEG und AGORA-C

Auf Grundlage der Erfahrungen mit RDS/TMC wurde die **TPEG-Technologie** im Rahmen eines EU-Förderprojektes (1998 -2002) entwickelt. Die hierarchisch strukturierten Meldungen ermöglichen den Empfang, die Dekodierung und die Filterung für eine sprachunabhängige Darstellung im Endgerät (EBU, 2007).

Das hohe geografische Auflösungsvermögen ermöglicht die Nutzung weiterer Informationen wie z.B. Straßennamen. Dabei werden die Daten ebenso wie bei den anderen genannten Verfahren nur unidirektional ausgestrahlt. Die Informationscodierung erfolgt derart, dass sie nicht vom verwendeten Kartenmaterial im Empfangsgerät abhängig ist. Als Übertragungswege stehen neben DAB auch DVB, DRM und DMB per Definition zur Verfügung. Als Datenformat ist neben dem so genannten TPEG-binär auch das tpegml, ein XML-basiertes Format, vorhanden (Petrov & Schierbaum, 2005).

Der **AGORA-C** Standard wurde im Zuge des von der EU geförderten Projektes AGORA entwickelt. Der Zusatz C steht dabei für Compact und drückt somit ein vorrangiges Ziel aus, nämlich eine hohe Datendichte bei minimaler Datengröße zu realisieren. Des Weiteren sollte ein international gültiger Standard für die Codierung von Orten außerhalb der bislang gebräuchlichen, festen Ortsdefinition in digitalen Straßenkarten aufgestellt werden.

Der Unterschied zu dem TPEG besteht darin, dass nicht auf eine vorher festgelegte Liste von geocodierten Orten zurückgegriffen werden muss. AGORA-C ermöglicht es, einen direkten Ortsbezug herzustellen, welcher neben der freien Platzierung auch unabhängig vom Erfassungs- und Darstellungssystem ist.

Bei umfangreichen Tests des Systems konnte neben einer Datengröße von 34 Bytes eine Erfolgsrate von ca. 98% nachgewiesen werden. Damit liegt die Größe deutlich unter den avisierten 50 Bytes (Wevers & Hendriks, 2007).

2.3 Zusammenfassung

Der grundlegende Aufbau der Navigation als Folge von Prozessen wurde in diesem Kapitel dargestellt. Neben einer akkuraten Ortsbestimmung vor der Routenberechnung und während der Zielführung spielt die Kartengrundlage eine wichtige Rolle, da sie die Eigenschaften der Streckenabschnitte in Form von vordefinierten Attributen verwaltet. Dieser Exkurs wurde unternommen, um einen Einblick in die Zusammenhänge im Bereich Navigation zu geben, und ein grundlegendes Verständnis für die späteren Arbeitsschritte bei der Umsetzung einer individualisierten Navigation zu vermitteln.

Durch die Ausstrahlung von Verkehrsinformationen erfolgt nicht nur die Verbesserung des Verkehrsflusses, sie dienen ebenfalls der Steigerung der Sicherheit im Straßenverkehr, beispielsweise durch Gefahrenwarnungen.

Wie sich die Population der Autofahrer in Hinblick auf relevant Merkmale der individuellen Navigation strukturiert klassifizieren lässt, und welche Methoden dabei zur Anwendung kommen können, wird im nun folgenden Kapitel 3 dargelegt.

3 Identifikation relevanter Merkmale für die individuelle Routenberechnung

Die im Kapitel 2 dargestellte, konventionelle Routenplanung soll im Zuge dieser Arbeit um die Komponente der Berücksichtigung eines individuellen Profils erweitert werden. Relevante Strecken- und Personenmerkmale müssen dazu zunächst identifiziert werden, was im Folgenden aufgezeigt wird.

3.1 Relevante Streckenmerkmale

Für eine Auswahl relevanter Streckenmerkmale eignet sich als Grundlage eine Differenzierung analog zu den Fahrbahnstraßenkategorien der RAS-N (FGSV, 1988).

Als potentiell relevante Infrastrukturbereiche wurden folgende drei Straßenverkehrsbereiche identifiziert: Autobahnen, sowie einspurige und zweispurig Innerortsstraßen.

Aus dem Bereich der anbaufreien Außerortsstraßen wurde die Autobahn (A I und B I) einbezogen. Die Kategorien A II bis A VI und B II bis B IV der Bundes- und Landstraßen bieten in Bezug auf das im Weiteren erläuterte Konzept der Interaktion zu wenig Varianz, so dass sie im Zuge einer robusten Umsetzung keine spezielle Gewichtung erhalten.

Bei den angebauten, innerörtlichen Strecken wurden die Kategorien mit einspuriger (C III und C IV) und zweispuriger (C III) Streckenführung in der Verbindungsfunktion berücksichtigt. Sie dienen der Verbindungsfunktion. Strecken der Verbindungskategorie D und E wurden aufgrund der Erschließungsfunktion nicht in Betracht gezogen. Sie dienen im Allgemeinen nur dem Anliegerverkehr einer Straße. Auch deren Gewichtung wird bei der individualisierten Routengenerierung nicht weiter verändert.

Eine weiter differenzierte Betrachtung kann durch die Berücksichtigung von potentiellen Interaktionen mit anderen Verkehrsteilnehmern erfolgen, wobei sich das Modell der Konfliktpunkte in Kreuzungen anbietet.

Diese zweite Einteilung in Unterkategorien erfolgt in Bezug auf eine mögliche Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern, von welcher eine entsprechende Unsicherheit und daraus resultierende Belastung ausgehen kann. Eine Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern führt im Allgemeinen dazu, dass der Fahrer nicht nur abhängig vom eigenen Fahrverhalten ist, er muss die Aktionen und Reaktionen anderer Fahrer mit beobachten und ggf. berücksichtigen. Dies führt normalerweise zu einer höheren Belastung, was individuell unterschiedliche Auswirkungen auf die auftretende Beanspruchung zur Folge hat.

Die Einteilung erfolgte nach dem Konzept der Konfliktpunkte von Verkehrsströmen, wie sie für die Erstellung des Regelungskonzeptes einer ampelgeregelten Kreuzung angewendet wird (Haller, 2006). Die Abbildung 11 zeigt ein Beispiel.

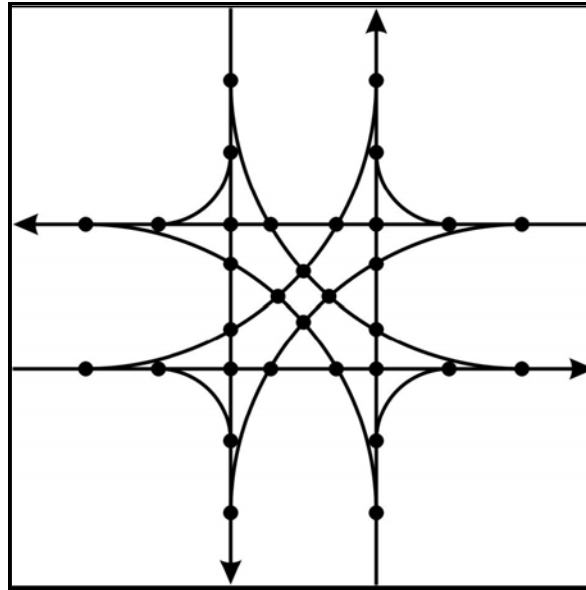


Abbildung 11: Konfliktpunkte in Kreuzungen (Haller, 2006)

Hiernach müssen sich kreuzende Verkehrsströme durch eine entsprechende Schaltung der Ampelanlage separieren lassen, um Konflikte in der Vorfahrtsregelung zu unterbinden. Nutzt man dieses Konzept und betrachtet nur die Anzahl und Richtung der konkurrierenden Verkehrsströme in Bereichen mit und ohne Regelung, kann hier die Schwierigkeit der Situationsbewältigung abgeschätzt werden. Je mehr Ströme konkurrieren, desto höher kann die mögliche Belastung werden, da aus allen Stromrichtungen mit konkurrierendem Verkehr gerechnet werden muss.

Gleiches gilt für die Heterogenität der Richtungen, aus welchen die konkurrierenden Verkehrsströme kommen können. Je stumpfer der aufgespannte Winkel zwischen allen konkurrierenden Verkehrsströmen aus Sicht des Fahrers, desto stärker muss die Aufmerksamkeit verteilt werden. Als Folge ist mit einer Belastungssteigerung zu rechnen.

Wie sich die beiden Kategorisierungen der Streckenmerkmale in einem Modell zusammenfügen, zeigt die Abbildung 12.

Aufteilung der Verkehrssituationen

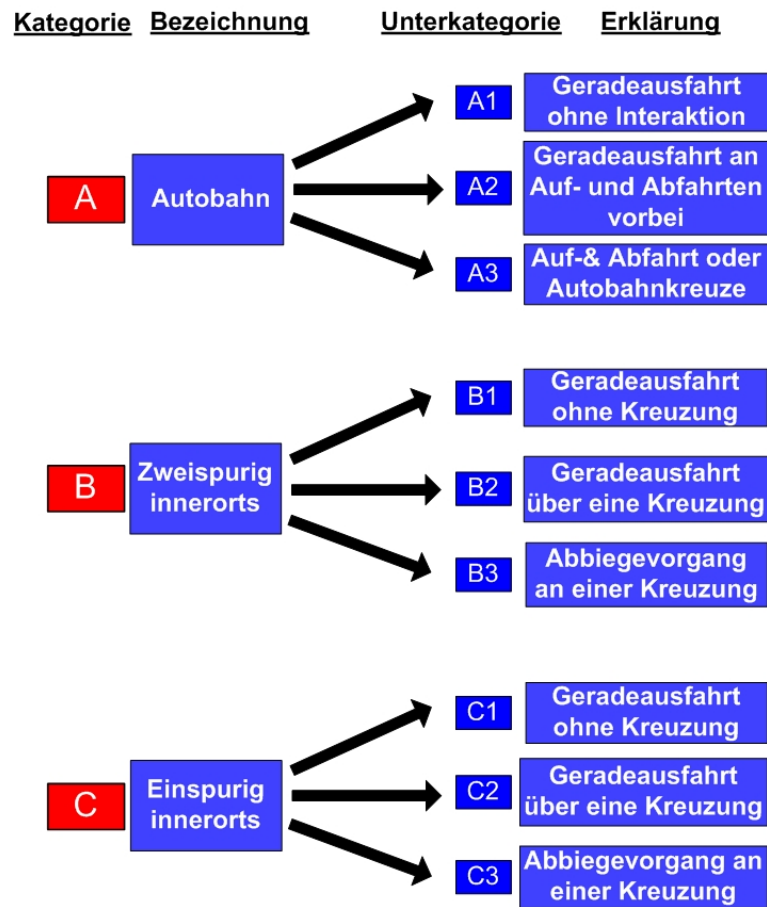


Abbildung 12: Kategorisierung relevanter Fahrsituationen

Dass neben den Streckenmerkmalen auch die Personenmerkmale eine große Bedeutung besitzen, zeigt das folgende Kapitel 3.2. Hier werden die Merkmale und korrespondierend die Methoden zu ihrer Quantifizierung angeführt.

3.2 Relevante Personenmerkmale

Als Grundlage für eine individuell angepasste Fahrtroute wurden dauerhafte Eigenschaften, Fähigkeiten und Fertigkeiten des Fahrers als Kriterien untersucht. Dabei handelt es sich um Merkmale, welche über eine möglichst lange Zeitdauer stabil sind und keinem situativen Einfluss unterliegen.

Bei der Erhebung solcher Merkmale ist anzumerken, dass je nach Erhebungsmethode unterschiedliche Verzerrungen der Ergebnisse vorkommen können. Die Unterschiede zwischen Eigenbild und Fremdbild werden offensichtlich, wenn man der Selbsteinschätzung einer Person die Beobachtungen durch eine andere Person gegenüberstellt (Riedel & Arbinger, 1997).

Neben der Problematik, sich als Person selber einzuschätzen, gibt es z.B. auch die Effekte sozialer Erwünschtheit. Es werden dabei von einer befragten Person aktiv Sachverhalte geändert, sollte das eigene Handeln nicht in Konformität mit sozialen Normen einhergehen. Dieser Effekt tritt besonders stark in Erscheinung, wenn die Erhebung keiner Anonymisierung unterliegt.

Einer der grundlegenden Mechanismen der psychischen Selbsterhaltung von Personen liegt des Weiteren in der Korrektur des Eigenbildes, wobei unerwünschtes Handeln oder fehlende Fähigkeiten oder Fertigkeiten verleugnet werden. Dies geschieht nach Mummendey (1999) zumeist unbewusst.

Ebenfalls ist bei der Beantwortung von Fragen mit einer bipolaren, mehrstufigen Antwortskala eine allgemeine Tendenz zur Mitte bekannt, was eine geringere Differenzierung mit sich führt. Bei dichotomen Items mit einem Ja/Nein-Antwortformat findet sich eine Bevorzugung der zustimmenden Antwortkategorie. Darüber hinaus sind eine ganze Reihe weiterer Antworttendenzen bekannt, die z.T. an bestimmte Antwortformate gebunden sind, andererseits aber auch allgemeinen Charakter besitzen (Schandry, 1998).

Zunächst werden gängige Typisierungsmethoden und Items dargestellt, um im weiteren Verlauf eine eigene Methode der Typisierung zu entwickeln, welche der Fragestellung dieser Arbeit besser gerecht wird.

3.2.1 Demografische Merkmale

Bei den demografischen Merkmalen handelt es sich um grundlegende Eigenschaften einer Person. Diese können direkt angegeben werden. Die beiden wichtigsten sind im Allgemeinen das Alter und das Geschlecht.

Mit dem **Alter** verändert sich grundlegend die Fähigkeit der Informationsaufnahme und Weiterverarbeitung. Die Leistungseinbußen und deren Entwicklung über das Alter sind bereits vielfach untersucht worden (vgl. Rimmö & Hakamies-Blomqvist, 2002 und Reschnar & Schlag, 2002). Unmittelbar abhängig von diesen Leistungseinbußen verringert sich auch die Beurteilungsleistung bei Entscheidungs- und Denkprozessen (Abendroth, 2001).

Das Alter könnte daher allgemein als Indikator für eine nachlassende Geschwindigkeit des Informationsaufnahme- und -verarbeitungsprozesses dienen. Das biologische, direkt bestimmbare Alter ist jedoch nur ein bedingt verlässlicher Indikator für die Leistungsfähigkeit, was diverse Forschungen belegen (Schultz & Schultz, 2003).

Im Rahmen einer Studie von Abendroth (2001) zum Thema altersabhängige Anpassung eines ACC-Systems, erwies sich das Alter allerdings als ein wesentlicher Faktor der Beeinflussung von Leistungsmaßen und des Fahrverhaltens. Daraus wurde abgeleitet, dass ein individuell angepasstes ACC-System eine besondere Anpassungsleistung bei älteren Fahrern erfordert.

Im Gegensatz zu den nachlassenden Fähigkeiten nimmt der Grad der Fertigkeiten im Allgemeinen bis zu einem bestimmten Alter zu. Man kann andererseits aber auch anführen, dass bei jüngeren Fahrern im Allgemeinen die Fähigkeiten wesentlich besser ausgeprägt sind als

bei älteren Fahrern. Die Fertigkeiten sind jedoch noch nicht so ausgeprägt, da sie durch Lernprozesse aufgebaut werden müssen. Am besten wird dieser Umstand sichtbar, wenn man den Zusammenhang zwischen der Häufigkeit der Verursachung von Verkehrsunfällen und dem Alter betrachtet. In der folgenden Abbildung 13 ist diese wannenförmige Funktion dargestellt, bei welcher die Anteile der Hauptverursacher (in Prozent) der an Unfällen im Jahr 2005 beteiligten Pkw-Fahrer nach Altersgruppen und Geschlecht angeführt sind.

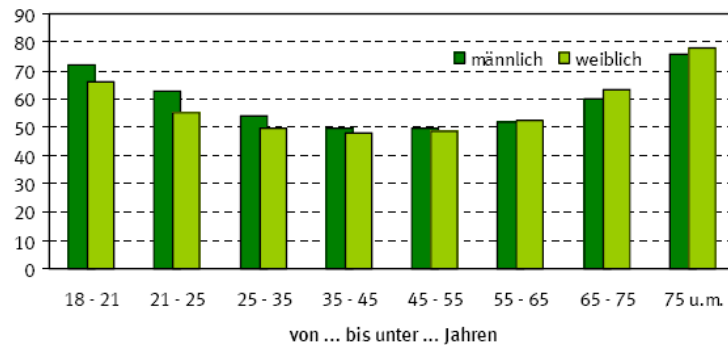


Abbildung 13: Hauptverursacher von PKW-Unfällen 2005 in [%] (Vorndran, 2006)

Es macht jedoch einen bedeutenden Unterschied, ob die Anzahl der gefahrenen Kilometer als erweiterte Basis, wie z.B. bei Fastenmeier und Gstalter (2006), dient oder nicht. Da ältere Fahrer im Allgemeinen eine geringere Kilometerleistung im Jahr aufweisen, werden sie bei dieser Basis als auffälliger dargestellt als bei der reinen Anzahl an Unfällen in Bezug auf die Altersgruppen. Die folgende Abbildung 14 stellt dies sehr anschaulich dar.

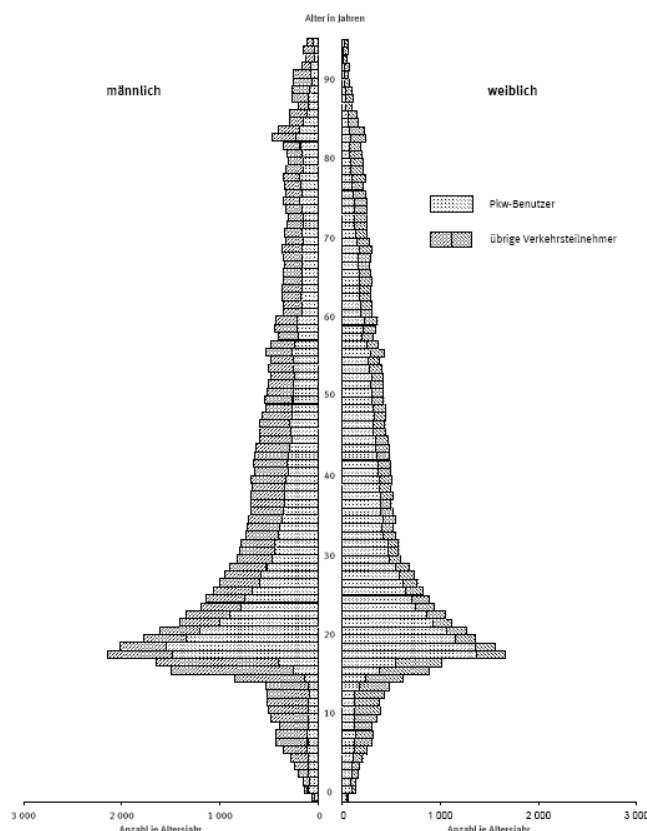


Abbildung 14: Verkehrsunfälle 2003 (Statistisches Bundesamt, 2005)
Verunglückte nach Altergruppe je 100.000 Einwohner

Abschließend ist zu sagen, dass das biologische Alter einer Person wenig über ihr „gefühltes“ Alter und auch nur bedingt etwas über die individuelle Leistungsfähigkeit aussagt, da diese im Wesentlichen durch Erlebnisse wie Krankheiten, Unfälle oder Lebenswandel geprägt wird.

Dass ältere Fahrer drüber hinaus ihr Fahrverhalten an die wahrgenommenen Risiken anpassen, findet sich unter anderem bei der Studie von Langford und Koppel (2006).

Das Merkmal **Geschlecht** wird ebenfalls häufig als Klassifizierungsgröße verwendet (Tränkle & Metker, 1992), nicht zuletzt, weil dessen Erhebung ebenso leicht und eindeutig ist wie bei dem Merkmal Alter. Allerdings trägt die Ausprägung nur auf sehr allgemeinem Niveau zu einer Klassifizierung bei, da die interindividuelle Varianz in den meisten Fällen größer ist als die geschlechtsspezifische.

Sehr allgemeine Ergebnisse hinsichtlich dieses Kriteriums finden sich in den Untersuchungen von Haas et al. (1991), wobei sich Unterschiede zwischen Männern und Frauen in Bezug auf die durchschnittliche Gesamtfahrleistung als auch in Bezug auf die Jahresfahrleistung ergeben. Küster und Reiter (1987) fanden Unterschiede in der Geschwindigkeitswahl und nach Tränkle und Metker (1992) gibt es Differenzen bei der Einschätzung des eigenen Fahrkönnens.

Zusammenfassend lässt sich anmerken, dass Geschlecht und Alter nur bedingt für eine Typisierung geeignet sind. Allerdings können sie als erklärende Variablen im Zuge einer maximalen Differenzierbarkeit in eine Fahrertypisierung aufgenommen werden.

3.2.2 Fahrdemografische Merkmale

Bei den fahrdemografischen Merkmalen handelt es sich um Eigenschaften einer Person in Bezug auf die Nutzung eines selbstgesteuerten Straßenverkehrsmittels, in diesem Fall eingeschränkt auf den Bereich des individuellen Personenverkehrs. Zu diesen Merkmalen gehören Fahrerfahrung und Fahrstil.

Die **Fahrerfahrung** sagt etwas darüber aus, in wieweit die Fertigkeit des Fahrens vom Fahrer ausgeführt bzw. trainiert wurde. Sie lässt sich durch mehrere Kennwerte abbilden, z.B. die Gesamtkilometerleistung, die jährliche Kilometerleistung, die Anzahl der gefahrenen Fahrzeugklassen bis hin zu der Anzahl an unterschiedlichen Fahrzeugmodellen, welche der Fahrer mit einer nennenswerten Fahrleistung gefahren hat. Die oben angeführten Leistungsdaten zählen zu den quantitativen Fahrerfahrungsdaten. Als Pendant dazu lassen sich ebenfalls qualitative Fahrerfahrungsdaten anführen. Zu diesen zählen relative Anteile an Autobahn-, Stadt- und Landstraßenfahrten (Abendroth 2001).

Eine zunehmende Fahrerfahrung wird zudem im Allgemeinen mit einer erhöhten Kontrollierbarkeit des Fahrzeugs assoziiert sein.

Der **Fahrstil** hängt unmittelbar von zwei Faktoren ab. Zum einen von der Persönlichkeit des Fahrers und zum anderen von der Fahrerfahrung (Abendroth, 2001). Da die Fahrerfahrung bereits zu den grundlegenden Merkmalen gehört und die Persönlichkeit des Fahrers besser über Motive oder Persönlichkeitstests bestimmt wird, handelt es sich hierbei eher um ein

Merkmal, welches mehrere Eigenschaften des Fahrers kombiniert. Je nach Aufgabenstellung muss daher abgewogen werden, ob einzelne oder kombinierte Eigenschaften für eine dazu passende Typisierung am besten geeignet sind.

3.2.3 Motivbasierte Merkmale

Die Erforschung von Fahrmotiven findet ihren Ursprung in Arbeiten einer Gruppe um Berger et al., (1975). Aufgrund von tiefenpsychologischen Interviews differenzierten sie zunächst zwei Grundmotive: das *Motiv des Auslebens* und das *Motiv des Absicherns* (Ängstlichkeit). Diese beiden Merkmale wurden mehrfach in Untersuchungen bestätigt und sind seit dem ein fester Bestandteil der verkehrspsychologischen Erklärungskonzepte (Klebensberg, 1982). Im Laufe der Zeit wurden diese Grundmotive um andere erweitert, um eine bessere Differenzierung zu erhalten (vgl. Grimmer et al., 1995 und Adelt et al., 1997).

Im Folgenden sind die im engeren Sinne relevanten Studien angeführt, bei welchen u. a. motivbasierte Merkmale eingesetzt wurden. In Anlehnung an diese soll die Entwicklung einer Kategorisierung von Fahrern bei der Umsetzung der individualisierten Routenplanung erfolgen.

Autofahrertypen auf Deutschlands Straßen

Eine von Adelt, Grimmer und Stephan durchgeführte Studie (1997) baut auf mehreren vorhergehenden Untersuchungen auf. In einer Studie von Grimmer et al. aus dem Jahr 1995 wurde bereits gezeigt, dass mit Hilfe von Fahrmotiven und Aussagen zu Einstellungen zum Autofahren auf die Akzeptanz von Navigations- und Verkehrsführungssystemen geschlossen werden kann (Grimmer et al., 1995). Dabei konnten psychologische Merkmale wie Fahrmotive und Einstellungen die Unterschiede in der Akzeptanz von Navigationssystemen und Verkehrsführungssystemen besser erklären als soziodemografische Gruppenzugehörigkeiten. Des Weiteren wurden Zusammenhänge zwischen den psychologischen Merkmalen und soziodemografischen Merkmalen aufgezeigt.

Adelt et al. untersuchten 1997 Motive und Funktionen des Autofahrens (Adelt et al., 1997). Nach den Ergebnissen dieser Studie steht das *Gefühl von Freiheit* an erster Stelle, gefolgt von denen der *Entspannung*, *Aufregung*, *Sportlichkeit* und des *Nervenkitzels*. Die *Bewunderung Anderer*, das *Grenzen erfahren*, das *Anderen imponieren* und *sich mit anderen messen* sind dort ebenfalls als Motive belegt.

Unter den Fahrstilen des **Auslebens** werden unterschieden: *Thrill* (Freude am riskanten Fahren), *Machtentfaltung* (Leistungspotenzial gegenüber Anderen zeigen) und *Erproben* (Bestätigung der eigenen Fahrkompetenz). Zum **Absichern** gehören: *Gleiten* (entspanntes, ausgeglichenes Fahren) und *Pilotieren* (gelassenes Fahren). Ebenfalls wurden **Autonomie-Motive** gefunden wie: *Widerstand gegen Einschränkungen von außen* und *Gefühl der Unabhängigkeit und Freiheit*. Schlussendlich gab es noch weitere Motive wie: *Flucht & Aggressionsabbau* sowie *Spaß & Entspannung*.

Die 1999 durchgeführte Studie von Adelt, Grimmer und Stephan bildete letztendlich 13 Dimensionen über verschiedene Fragen ab. Als Ergebnis konnten sechs Typen deutscher Autofahrer unterschieden werden:

1. Der **Funktionalist** (19% der Population): Er ist der Repräsentant des „Durchschnittsfahrers“. Das Auto ist ein reiner Gebrauchsgegenstand. Sein Fahrstil ist unauffällig.
2. Der **Ängstliche** (17% der Population): Er repräsentiert den unsicheren Wenigfahrer. Für den Ängstlichen ist das Autofahren überaus angstbesetzt, und er fährt deshalb sehr zurückhaltend und langsam.
3. Der **Gelassene** (16% der Population): Der Genießer unter den Fahrern. Er reagiert gelassen und beherrscht sein Fahrzeug souverän. Das Auto hat jedoch keine Funktion als Statussymbol oder Hobby.
4. Der **Vorsichtige** (16% der Population): Er hat zwar gelegentlich Angst im Straßenverkehr, aber er fährt trotzdem sehr gerne Auto. Fährt ausgesprochen zurückhaltend, vernünftig und vermeidet jedes Risiko.
5. Der **Raser** (15% der Population): Er lebt seine Lust am Risiko voll aus, sucht Abenteuer, Anerkennung und Bestätigung im schnellen, geschickten Fahren. Das Auto ist Hobby und Prestigeobjekt.
6. Der **Frustrierte** (17% der Population): Er sucht im Auto ebenfalls nach Abenteuer, Anerkennung und Selbstbestätigung. Er kann diese Motive jedoch kaum ausleben, da er wenig Geld und selten Familie besitzt. Andere Verkehrsteilnehmer sind für ihn feindliche Gegner.

Eine Kategorisierung von Fahrern, wie sie oben angeführt ist, soll auch bei der späteren Umsetzung im Zuge dieser Arbeit erfolgen.

Studie von Abendroth zum ACC- Einsatz

Im Jahr 2001 wurde von Bettina Abendroth eine Studie mit dem Namen „Gestaltungspotentiale für ein PKW-Abstandsregelsystem unter Berücksichtigung verschiedener Fahrertypen“ zur Akzeptanz und nur Anpassung eines ACC-Systems in Bezug auf verschiedene Fahrertypen durchgeführt (Abendroth, 2001). Autofahrer wurden dabei auf zwei Arten klassifiziert, nämlich aufgrund von (fahr-)demografischen Daten und aufgrund ihres Fahrstils.

Die erste Typisierung auf Basis der (fahr-)demographischen Daten erfolgte aufgrund von 13 Basisitems zu Alter (2 Items), Fahrerfahrung (6 Items), Tempomaterfahrung (3 Items) und Einstellung zum Auto und Autofahren (2 Items). Die für die Studie relevanten Daten wurden dann selektiert.

Der Gegenstand der Studie war die Nutzung und Akzeptanz eines ACC-Systems, wobei die folgenden Merkmale als Prädiktoren genutzt werden konnten:

- Alter
- Gesamtkilometerleistung
- Anteil der Gesamtfahrleistung im Stadtbereich
- Anteil der Gesamtfahrleistung auf Bundes- und Landstraßen
- Anteil der Gesamtfahrleistung auf Autobahnen

Eine anschließende Faktorenanalyse ergab zwei interpretierbare Faktoren: die *quantitative Fahrerfahrung* und die *qualitative Fahrerfahrung*. Auf der Basis dieser Faktoren wurde eine Clusteranalyse durchgeführt, nach der folgende vier Fahrertypen beschrieben werden konnten:

- Typ 1: mittlerer Altersbereich, mittlere Gesamtfahrleistung, höhere Fahrerfahrung im Stadtbereich
- Typ 2: jüngere Fahrer mit niedrigerer Gesamtfahrleistung
- Typ 3: unterer und mittlerer Altersbereich, überwiegend Fahrerfahrung auf Autobahnen, Langstreckenfahrer
- Typ 4: ältere Fahrer mit hoher Gesamtfahrleistung und einem hohen Autobahnanteil

Für die zweite Typisierung auf Basis des Fahrverhaltens wurden bei Versuchsfahrten Daten erhoben, welche sich primär auf das Fahrerverhalten in Bezug auf die Fahrzeuglängsführung in bestimmten Verkehrssituationen bezogen. Folgende Merkmale wurden als relevant eingestuft und für die Klassifizierung genutzt:

- Geschwindigkeit in der Fahrsituation freie Fahrt
- Zeitlücke bei gebundener Fahrt (Abstand)
- Verzögerung beim Auffahren
- Beschleunigung beim Ausscheren

Eine Faktorenanalyse ergab hierbei zwei Faktoren, nämlich Sportlichkeit, ausgedrückt in den Items Beschleunigung, Verzögerung und Geschwindigkeit sowie das Sicherheitsbedürfnis, ausgedrückt durch den Abstand. Folgende drei Fahrertypen ließen sich auf der Basis einer Clusteranalyse beschreiben:

- Typ 1: langsamere, komfortbewusste Fahrer
- Typ 2: Durchschnittsfahrer mit hohem Sicherheitsbedürfnis

- Typ 3: schnelle, sportliche Fahrer, die gerne dicht auffahren

Die Ergebnisse dieser Studie hängen sehr stark von dem Untersuchungsgegenstand ab, so dass der Ansatz nicht ohne entsprechende Anpassungsmaßnahmen bei der Typisierung zur individualisierten Routenplanung verwendet werden kann.

S.A.N.T.O.S.

Die Ziele des vom BMBF geförderten Projektes „S.A.N.T.O.S. – Situations – Angepasste und Nutzer – Typ – zentrierte Optimierung von Systemen zur Fahrerunterstützung“ (1998- 2001) beziehen sich auf die Erhöhung der aktiven Sicherheit. Dies soll sowohl nutzerorientiert als auch situationsangepasst erfolgen (König, 2002).

Im Zuge des Projektes erfolgte die Bestimmung von Fahrertypen mit Hilfe eines Selbstbeurteilungsfragebogens nach Assmann (Assmann, 1985). Die Versuchspersonen mussten mit Hilfe von Polaritäten-Profilen ihren Fahrstil einschätzen, wobei sechs Abstufungen von 1 (gelassen) bis 6 (dynamisch) unterschieden werden konnten (Marstaller, 2002; Bubb, 2003). Die drei Hauptfaktoren zur Fahrerklassifizierung konnten in *Einstellung zum Verkehrsgeschehen und zu den anderen Verkehrsteilnehmern*, *Persönliche Einstellung zum Auto* und *Beurteilung der eigenen Fähigkeiten* aufgeteilt werden.

In Bezug auf den Fahrstil erfolgte eine Klassifizierung bei Versuchsfahrten durch nur einen Versuchsleiter. Dieser gruppierte die Fahrer aufgrund eines bereits vorhandenen, standardisierten Ratingfragebogens nach Winner (1996) in die Fahrerkategorien:

- sportlich-draufgängerisch
- dynamisch-progressiv
- routiniert-abgeklärt
- unauffällig-konservativ
- ängstlich-zurückhaltend ein.

„Die Einteilung des Fahrstils in die fünf Klassen ist allerdings mit einigen Unzulänglichkeiten behaftet: So wurde in der Beurteilung eine Fahrstilklasse für die komplette Versuchsfahrt festgelegt, einzelne Situationen, in denen sich der Fahrer jedoch ganz unterschiedlich verhielt, waren dadurch aber nicht mehr auszumachen. Zudem erfolgte die Einschätzung subjektiv durch den Versuchsleiter.“ (König, 2002).

Fahrstile als Prädiktor für bevorzugte Fahrbereiche

Berger et al. (1975) konnten bereits Unterschiede in der Realisierung bestimmter Fahrformen in den Bereichen Stadt-, Land- und Autobahnfahrten zeigen. Personen mit bestimmten Fahrstilen bevorzugten die Fahrbereiche, welche die von ihnen präferierte Fahrform am ehesten ermöglichen. Die Fahrmotive bildeten dabei die Ausgangsbasis für die Ableitung von Fahrstilen, welche die Fahrer realisieren wollen.

Im Bereich der Landstraßen konnten die meisten Fahrstile problemlos ausgelebt werden. Es resultieren kaum Einschränkungen aus der Umgebung, so dass sich Autonomietendenzen, die Fahrform des Gleitens, aber auch Kraftentfaltungstendenzen ausleben ließen. Im Gegensatz besaß der städtische Bereich eine sehr große Einschränkung der Fahrstile aufgrund seiner Limitierungen in Bezug auf Geschwindigkeiten und unbeeinflusstes Fahren.

Klassifizierung mittels Verhaltensbeobachtungen von Quenault

Die Untersuchungen von Quenault aus dem Jahr 1969 beziehen sich auf Verhaltensbeobachtungen des Fahrers im realen Verkehr (Quenault, 1969). 340 Probanden nahmen an der Studie teil, deren grundlegende Methode am Road Research Laboratory in England entwickelt wurde. Es erfolgte die Aufstellung eines Sets von Beobachtungssitems, anhand welcher die Fahrer bei der Versuchsfahrt bewertet wurden. Die dabei entstandenen Fahrindices bildeten die Grundlage eines Vergleichs zwischen einer Gruppe verkehrsauffälliger Personen und der als Kontrolle dienenden Zufallsstichprobe. Die Differenzierung basierte dabei auf den drei Verhaltensfaktoren: *Geschwindigkeitsfaktor*, *Voraussichtsfaktor* und *Orientierungsfaktor*. Auf dieser Grundlage erfolgte die Klassifizierung von vier unterschiedlichen Typen.

Die **Safe Drivers** zeichnen sich dadurch aus, dass sie kein Fehlverhalten, keine Risiken und keine unnötigen Manöver zeigen. Das Gefährdungspotential für sich und andere ist sehr gering.

Die **Injudicious Drivers** zeigen, wie die Safe Drivers, eine hohe Aufmerksamkeit beim Fahren, was in der Studie z.B. anhand des Indices der Spiegelnutzung aufgezeigt wird. Allerdings treten bei diesen Fahrern einige unnötige Fahrmanöver sowie eine geringe Anzahl an Fehlhandlungen auf.

Die **Dissociated Active Drivers** sind in ihrem Verhalten weniger aufmerksam, wobei sie wie die Injudicious Drivers Fehlhandlungen, risikobehaftetes Fahren und unnötige Manöver zeigen. Die Handlungen des Fahrers werden bei diesem Typ deutlich von diesem selbst aktiv herbeigeführt.

Große Unterschiede zu den vorangegangenen Typen bestehen bei den **Dissociated Passive Drivers** darin, dass sie weniger durch aktives Handeln in risikobehaftete Situation kommen. Aufgrund der Fahrweise werden sie aber öfters passiv in eine entsprechende Situation gedrängt. Ebenfalls treten Fehlhandlungen, unnötige Fahrmanöver und risikobehaftetes Fahren auf.

3.2.4 Nutzung der Physiologie zur Fahrertypisierung

Zur individuellen Adaption einer Routengenerierung gehören, wie bereits erwähnt, auch Faktoren, welche den situativen Fahrerzustand widerspiegeln. Im Allgemeinen handelt es sich dabei um sogenannte Stressoren, welche nur indirekt erhoben und berücksichtigt werden können. Grundlage für die Erfassung der Auswirkungen, resultierend aus allgemeinen und individuellen Einflussfaktoren, ist dabei die Reaktion des Menschen auf diese Stressoren. Die Untersuchungen von Fastenmeier (1995) zeigen beispielsweise die Differenzierung des situationsspezifischen Fahrverhaltens und des Informationsbedarfs verschiedener Fahrergruppen.

De Waard und Brookhuis haben 1990 Fahrversuche durchgeführt, wobei der Fahrerstatus über die Messung von physiologischen Daten erfasst wird. Die Versuchspersonen mussten, zum Teil unter geringem Alkoholeinfluss, Fahrzeugfolge-Manöver ausführen. Die Versuche wurden im Zuge des europäischen Forschungsprojektes „DRIVE - Dedicated Road Infrastructure for Vehicle Safety in Europe“ durchgeführt (De Waard & Brookhuis, 1990). Später kombinierten Brookhuis und De Waard Versuchsfahrten mit Fragebogenerhebungen (Brookhuis & De Waard, 2001).

Eine Definition der Begriffe Belastung und Beanspruchung erscheint an dieser Stelle angebracht und wird im Folgenden geleistet. Anschließend werden die Methoden der Messung entsprechender, physiologischer Daten erläutert. Ausführlichere Grundlagen zur Physiologie des Menschen sind des Weiteren in Schmidt et al. zu finden (Schmidt et al., 2004).

3.2.5 Modell der Belastung und Beanspruchung

In der DIN EN ISO 10075-1 werden die Begriffe Belastung und Beanspruchung grundsätzlich getrennt. Die Gesamtheit aller erfassbaren Einflüsse, welche von außen auf den Menschen psychisch einwirken, werden dort der psychischen Belastung zugeordnet. Diese Belastung führt dann mittelbar zu einer psychischen Beanspruchung (vgl. Hoyos & Kastner, 1986, Schmidtke & Bubb, 1993). Die Abbildung 15 zeigt diese Zusammenhänge anschaulich.

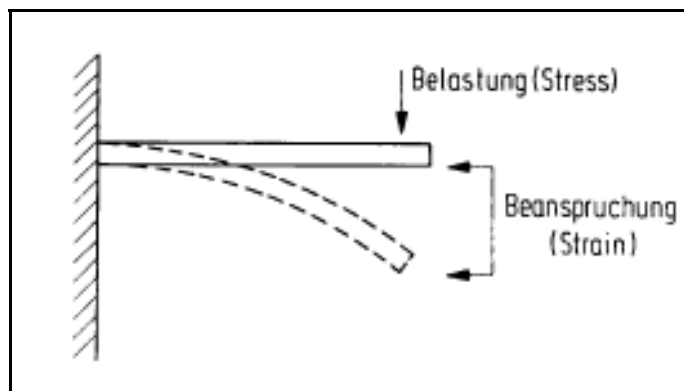


Abbildung 15: Modell der Belastung und Beanspruchung (Schmidtke & Bubb, 1993)

Im englischen Sprachgebrauch werden für Beanspruchung die Begriffe *workload* oder *strain* verwendet. Belastung wird mit *stress* übersetzt.

Als Beanspruchung wird, wie erwähnt, die unmittelbare, kurzfristige Auswirkung der psychischen Belastung in der Person verstanden. Diese ist abhängig von überdauernden und augenblicklichen Voraussetzungen inklusive individueller Bewältigungsstrategien. Lazarus hat sich mit diesem Thema eingehend beschäftigt (Lazarus, 1966; Lazarus & Launier, 1978, Lazarus & Launier, 1981).

Eine Belastungsanalyse findet sich bei Bokranz und Landau (1991). Dabei werden beispielsweise die Aufnahmekanäle der Informationen unterschieden. Messsysteme zur Beanspruchungsmessung werden ebenfalls angeführt.

Bei Nitsch (1981) werden die methodischen und strategischen Randbedingungen bei der Untersuchung von Stress aufgezeigt.

3.2.6 Physiologische Beanspruchungsmessungen

Grundlegend kann in subjektive und objektive Beanspruchungserfassung unterschieden werden. Die subjektive Beanspruchungsmessung erfolgt dabei über Interviews oder Fragebögen. Die mittels Fragebogen oder Interview erhobenen Daten sind vergleichsweise einfach und kostengünstig ermittelbar, allerdings stimmen sie nicht immer mit den objektiven Daten überein (Wickens, 1996).

Die im Kapitel 3.1 angeführte Problematik bei der Erhebung von Daten mittels Selbstauskunft muss allerdings berücksichtigt werden. Ein sehr bekannter Fragebogen zur Messung mentaler Beanspruchung ist der NASA Task Load Index (Pfendler, 1990).

Objektiv erfassbare Daten beziehen sich im Folgenden auf die aus dem Herz-Kreislauf-System ableitbaren Werte. Seit über 100 Jahren werden sie als psychophysiologische Indikatoren für eine psychische Beanspruchung verwendet (Luczak, 1987, Nickel et al., 2002). Der Körper regelt dabei die Leistung verschiedener Kreislauffunktionen in Abhängigkeit vom vorhandenen Belastungsniveau.

Als stabile Indikatoren der Beanspruchungsmessung werden die Herzrate und die Herzratenvariabilität z.B. bei Manzey (1998) angeführt. Mit steigender Beanspruchung nimmt die Herzfrequenz zu. Das Herz schlägt häufiger je Zeiteinheit.

Die Herzratenvariabilität nimmt mit einer Steigerung der Beanspruchung ab. Es schlägt also regelmäßiger (Manzey, 1998). Die Herzratenvariabilität ist nach diesen Untersuchungen eher ein verlässliches Maß für mentale Beanspruchung. Die Herzfrequenz soll demnach eher ein reliables Maß bei der Messung physischer Beanspruchung darstellen. Im Gegensatz dazu führt Piechulla (2007) an, dass auf dieser Grundlage nicht zwischen mentaler und körperlicher Beanspruchung unterschieden werden kann.

Healey und Picard können in ihrer Studie aus 2005 auf Basis der Herzfrequenz zwischen unterschiedlichen Stressniveaus unterscheiden. Ein geringes Stressniveau herrscht während einer Pause, ein mittleres Stressniveau tritt auf Autobahnabschnitten auf und ein hohes Stressniveau ist bei Stadtfahrten messbar (Healey, 2005).

Anzumerken sei zu derartigen Messungen, dass es für die Veränderungen im Herzkreislaufsystem weitere Einflussfaktoren, wie emotionale oder äußere thermische Faktoren, gibt. Die gemessenen Größen können zudem nur durch einen Faktor oder durch eine Kombination von Faktoren bedingt sein.

Zu den objektiven, direkt messbaren, physiologischen Daten gehören ebenfalls die Hautleitfähigkeit, die periphere Hauttemperatur, Muskelanspannungen, das Blickverhalten, die Lidschlagfrequenz und Stimmlageschwankungen.

Indirekt kann nach Horberry et al. (2006) auch aus der Wahl der Geschwindigkeit auf die Beanspruchung geschlossen werden. Demnach wird bei einer höheren Beanspruchung die Geschwindigkeit zumeist unbewusst verringert. In der Studie von Törnros und Bolling (2006) konnte nachgewiesen werden, dass beim Telefonieren während der Fahrt die Geschwindigkeit reduziert wurde.

Bukasa und Wenninger haben Mitte der 80er Jahre gängige Methoden zur Erfassung von Wahrnehmung, Aufmerksamkeit, Reaktionsverhalten, Sensomotorik, Intelligenz und Persönlichkeit mit Fahrproben kombiniert, um eine Fahrertypisierung aufzubauen (Bukasa & Wenninger, 1985). Dabei erfolgte auch die Darstellung des Zusammenhangs zwischen dem Fahrverhalten und den gängigen verkehrspsychologischen Testverfahren. Als Ergebnis konnten die folgenden vier Fahrertypen identifiziert werden: der *unauffällige Durchschnittsfahrer*, der *wenig routinierte-unentschlossene Fahrer*, der *sportlich-ambitionierte Fahrer* und der *risikofreudig-aggressive Fahrer*.

Das VEBIS-Verfahren – „Kölner Verfahren zur vergleichenden Erfassung der kognitiven Beanspruchung im Straßenverkehr“ wird bei Gelau (1999) vorgestellt. Dort findet man ebenfalls einen Überblick über die verkehrspsychologische Beanspruchungsmessung.

Hering (1999) zeigt in seiner Dissertation, wie eine standardisierte Messung der kognitiven Beanspruchung im Straßenverkehr umgesetzt werden kann. Dabei bezieht er sich auf die Arbeiten der VEBIS-Gruppe und legt den Schwerpunkt auf einen Feldtest.

Die Erläuterung der zugrundeliegenden Verfahren und Methoden zur Messung der angeführten Faktoren erfolgt in den nächsten Kapiteln.

Kardiovaskuläre Daten

Aus der Aktivität des Herzens lassen sich zwei grundlegende Indizes gewinnen: die *Herzrate* und das *Interbeat-Intervall* (IBI). Bestimmt werden diese Daten unter anderem mit Hilfe eines Elektrokardiogramms (EKG), wobei nur das Interbeat-Intervall und dessen Variabilität direkt gemessen werden. Die Herzfrequenz und die Variabilität der Herzfrequenz werden indirekt aus dem Interbeat-Intervall und seiner Variabilität errechnet. In der Abbildung 16 sind beispielhaft Interbeat-Intervalle dargestellt.



Abbildung 16: Darstellung der Messung des Interbeat-Intervalls

Bei der Kontraktion des Herzmuskels tritt eine Potentialänderung auf, welche sich noch auf der Hautoberfläche des Brustkorbs messen lässt. Aus der Größe, der Richtung und der Dauer

der Spannungsänderung kann auf den Zustand des Herzens und das Aktivitätspotential des Menschen geschlossen werden. Dies lässt sich mit Messsystemen erfassen und aufzeichnen.

Ein solches System ist das *HealthLab*, mit welchem die kardiovaskulären Daten aufgezeichnet werden. Es wird auch im Rahmen von Versuchsfahrten im Versuchsträger ViewCar® des Instituts für Verkehrssystemtechnik eingesetzt. Bei dem System erfolgt die Speicherung der Daten zunächst lokal im Gerät. Nach Beendigung der Messung werden die Daten kabellos an den Zentralrechner im ViewCar® übertragen und dort abgespeichert.

Erfolgreich wurde die Herzrate beispielsweise als Messkriterium bei der Analyse der Belastung von Piloten durch Wilson (2001) genutzt. Ein Vergleich zwischen der Belastung bei Flugschülern in bestimmten Prüfungssituationen und Fahrern wurde bereits von Platt (1970) durchgeführt. Wagner et al. (1998) setzen sich mit der Nutzbarkeit der Herzratenvariabilität auseinander, wobei sie sich auf die Erfassbarkeit, die Parametrisierung und die Validität fokussieren.

Die Variabilität des Interbeat-Intervalls und die Herzratenvariabilität geben beide ein Maß für die Regelmäßigkeit des Herzschlags an. Bei stärkerer Beanspruchung sinkt nach Manzey (1998) bei beiden die Variabilität, das Herz schlägt regelmäßiger.

Nickel et al. (2002) zweifeln die Verwendbarkeit der Herzfrequenz und Herzfrequenzvariabilität zur Messung der psychischen Beanspruchung an, da sie auf komplexen, variierenden Belastungsbedingungen aufbauen. Die Maße der Herzfrequenz und ihrer Variabilität sind demnach zwar personenbezogen hinreichend reliabel, jedoch in Bezug auf Validität, Sensitivität oder bei psychischer oder mentaler Beanspruchung nicht ausreichend aussagekräftig für eine Differenzierung hinsichtlich unterschiedlicher Quellen der Belastung.

Blutdruck

Bedingt durch körperliche und kognitive Belastungen verändert sich neben der Herzfrequenz auch der Blutdruck. Muss beim Anstieg der Herzfrequenz mehr Blut im gleichen Zeitraum bewegt werden, erhöht sich im gleichen Zuge der Blutdruck.

Die konventionelle Messung mittels Blutdruckmanschette ist jedoch nicht als Dauermessung möglich, sondern kann nur zu diskreten Zeitpunkten erfolgen. Deshalb bedient man sich des Umstands, dass ein Zusammenhang zwischen Blutdruck und Pulswellenlaufzeit bzw. Pulswellengeschwindigkeit besteht. Der Blutdruck kann somit indirekt über den Puls abgeleitet werden.

Der Blutdruck als Messwert eignet sich aufgrund seiner Charakteristik nur deskriptiv zur Stützung anderer Messwerte. Eine Trennung der auf körperlicher Anstrengung beruhenden Anteile und der Anteile aufgrund kognitiver oder emotionaler Belastung ist nicht möglich und kann allenfalls abgeschätzt werden.

Elektrodermale Hautaktivität

Eine weitere Messgröße stellt die Hautleitfähigkeit, bzw. die Ermittlung des Hautwiderstandes dar, welcher auch als elektrodermale Hautaktivität (EDA) bezeichnet wird. Mit Hilfe eines Fin-

gersensors kann die Hautleitfähigkeit, die periphere Temperatur und der Puls ermittelt werden. Er gehört zu dem bereits in Kapitel 0 beschriebenen System HealthLab.

Bei ansteigender Belastung des Fahrers werden im Allgemeinen die Herzaktivität und daraus resultierend auch die Durchblutung erhöht. Bei stärkerer Belastung reicht die körpereigene Regulation nicht mehr aus, so dass über eine Schweißabsonderung mit einhergehender Verdunstungskühlung die Temperatur abgesenkt wird. Der salzhaltige Schweiß erhöht dabei die Hautleitfähigkeit. Generell wird die Hautleitfähigkeit bei Schweißabsonderung über die Schweißdrüsenkanäle beeinflusst. Sind sie aktiv, stellen sie eine leitende Verbindung zur Dermis, einer Hautschicht, her. Des Weiteren wird das Vorhandensein von elektrisch aktiven Membranen angenommen, welche ebenfalls zu einer Erhöhung der Hautleitfähigkeit beitragen (Schandry, 1998).

Die elektrodermale Hautaktivität wird gemessen, indem zwischen zwei Elektrodenpunkten eine Spannung angelegt und über den resultierenden Strom der Hautwiderstand berechnet werden kann. Die Aufzeichnung dieser elektrodermalen Aktivität erfolgt üblicherweise mit einer Frequenz von 25 Hz im Messbereich zwischen ca. einem und 100 k Ω .

Die Messung der EDA schränkt die Probanden beim Fahren nur geringfügig ein. Bei längeren Versuchsdauern ist jedoch darauf zu achten, dass sich die Konfiguration nicht verändert, um eine Verfälschung der Messwerte zu verhindern.

Helander (1978) sieht in der Messung der elektrodermalen Aktivität die beste Erhebungsmethode physiologischer Beanspruchung bei stark wechselnden Arbeitsanforderungen.

Boucsein (1995, 1999) hat in Untersuchungen den Zusammenhang zwischen EDA und bestimmten Emotionen aufgezeigt. Aufgrund der vielfältigen und schwer zu berücksichtigten Einflussfaktoren kann dieser Messwert nicht als alleiniger Indikator genutzt werden. Ein ausreichendes Potential besitzt er allerdings in Kombination mit anderen Messwerten.

Collet et al. (2003) haben in ihrer Untersuchung die Hautleitfähigkeit mit einem Fragebogen zur Erhebung der Belastung kombiniert. Sie untersuchten dabei die Belastung von Busfahrern bei der Ausführung eines Kupplungs-Manövers ohne und mit einer automatischen Unterstützung. Als ein Ergebnis ihrer Studie geben die Autoren die Verwendbarkeit der elektrodermalen Aktivität als nutzbarer Indikator für die Erfassung mentaler Belastung an.

Hauttemperatur

Die Messung der Hauttemperatur kann ebenfalls zur Ermittlung des Belastungszustandes einer Person herangezogen werden. Mit steigender Belastung erhöhen sich, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, im Allgemeinen die Herzaktivität und damit auch die periphere Durchblutung. Das aus dem Körperinneren stammende, wärmere Blut wird dabei in die Körperperipherie geleitet, um es dort abzukühlen. Die Temperaturverringerung infolge der Abkühlung zeigt dabei die erhöhte Beanspruchung des Fahrers (Schultz & Schultz, 2003).

Als Messwert ist die Hauttemperatur, ebenso wie die elektrodermale Hautaktivität, lediglich als deskriptiver Indikator nutzbar. Der absolute Temperaturmesswert sowie seine zeitliche

Veränderung werden durch andere, äußere Faktoren wie die Umgebungstemperatur, die Luftfeuchtigkeit und die Luftbewegung, zu stark beeinflusst. (Schmidt und Thews, 1997).

Muskelspannungsmessung

Die Aufzeichnung der Muskelspannungsmessung erfolgt mittels Elektromyographie (EMG). Dabei werden die Summenpotentiale von Muskeln und die zugehörigen Amplituden und Frequenzen im Zuge der Muskelanspannung gemessen. Es lassen sich unter anderem die von den Muskeln erzeugten Kräfte grob ableiten und eine Einschätzung der muskulären Ermüdung ist möglich. Mit einer höheren Belastung steigen ebenfalls die Muskelspannungen einiger Muskelgruppen. De Waard (1996) beschreibt zum Beispiel, dass mentale Anstrengung und Reaktionen auf emotionale Reize zu einer gesteigerten Aktivität der Gesichtsmuskeln führen.

Blickverhalten

Zum Blickverhalten werden die *Augenbewegung* (Klingspohr et al., 1997) und die *Blickbewegung* gezählt (Wörmann, 2000). Aus diesen Indikatoren kann auf die Aktivität und die Belastung einer Person geschlossen werden (Fischer & Rößger, 2000). Die *Blickbewegung* gibt Aufschluss, wie lang und wie häufig ein Fixationspunkt angesehen wird. Die Fixationspunkte können z.B. andere Verkehrsteilnehmer oder eine Beschilderung betreffen. Es lässt sich also ableiten, ob der Fahrer im Prinzip in der Lage war, bestimmte Informationen aus seiner Umgebung zu extrahieren. Ob er sie wirklich wahrgenommen hat, lässt sich aus der Blickzuwendung nicht eindeutig ableiten. Man geht hier im Allgemeinen davon aus, dass eine mehrfache oder längere Fixation eines Objektes bewusst geschieht und der Fahrer die Information aufnimmt. Mit dieser Methode kann sehr gut erkannt werden, was der Fahrer nicht als Information erfasst hat, da er den Ort der Information nicht angesehen hat.

Aus der Dauer der Fixation lassen sich unter anderem Müdigkeit oder eine Gefahrenerkennung ableiten. Ist der Proband z.B. übermüdet, schwanken die Fixationsdauern sehr stark. Im Normalfall liegen diese zwischen 0,2 und 0,6 Sekunden. Eine deutlich längere Fixation tritt nur bei bewusstem Erkennen auf. Dies muss jedoch immer in Vergleich zu den aktuellen Durchschnittsfixationswerten des Probanden gesehen werden (Schmidt & Thews, 1997).

Die Erfassung kann dabei entweder direkt über entsprechende Sensoren oder indirekt über eine videobasierte Erkennung erfolgen. Bei der direkten Messung gibt es zwei bedeutende Methoden: das *Elektrookulogramm* (EOG) und die *Elektronystagmografie* (ENG). Beide beeinflussen Verhalten und Erleben des Probanden, da die notwendigen Sensoren im Bereich des Auges im Gesicht angebracht werden müssen. Ein solcher Eingriff kann eine Änderung des (Blick-) Verhaltens mit sich bringen. Das unten abgebildete System zeigt den Einbau eines Blickerfassungssystems im Versuchsfahrzeug ViewCar®, welches die Nachteile vermeidet.



Abbildung 17: Blickerfassungssystem im Versuchsfahrzeug ViewCar®

Der Vorteil der indirekten, videobasierten Blickverhaltensmessung, der Video-Okulografie, liegt darin, dass die Bewegung des Probanden nur geringfügig eingeschränkt ist. Lediglich bei Verlassen des durch die Videokameras abgedeckten Bereiches kann ein Datenverlust auftreten. Die Kameras können dabei fest vor dem Fahrer im Cockpit-Bereich oder an einer kopfgestützten Messeinrichtung angebracht sein. Beide Systeme besitzen unterschiedliche Vor- und Nachteile, so dass kein System pauschal als das bessere angesehen werden kann.

Lidschlag

Über die in Kapitel 0 angeführten Systeme kann ebenfalls der Lidschlag einer Person über die Zeit gemessen werden. Man unterscheidet dabei nach *Lidschlussdauer* und *Lidschlussfrequenz*. Eine abnehmende Lidschlussfrequenz ist beispielsweise ein Indikator für eine zunehmende Beanspruchung des Fahrers (Haider & Rohmert, 1976). Verlängert sich die Lidschlussdauer über ca. eine Sekunde, kann man von Mikroschlafvorfällen sprechen. Hieraus lässt sich auf die Müdigkeit des Fahrers im Allgemeinen schließen. Damit einhergehend verringert sich die aufgebrachte Aufmerksamkeit.

Die Messung des Lidschlages lässt nach Schandry (1998) nur einen indirekten, passiven Rückschluss auf die Beanspruchung des Fahrers zu, da unterschiedliche Reize für eine Veränderung des Lidschlages die Grundlage bilden können.

Stimmlageauswertung

Die Stimmlage und deren zeitliche Veränderung lassen sich nur messen, wenn der Proband während des Versuchs regelmäßig spricht. Das Gesprächsthema besitzt einen eigenen Einfluss auf die Beanspruchung und die Emotionen des Fahrers, so dass hierdurch eine Verfälschung zustande kommen kann. Scherer (2002) beschreibt, wie sich bestimmte Emotionen auf die

Stimmlage auswirken und woran sich typische Stimmlagebilder erkennen lassen. Die Auswertung der Stimmlage und ihrer zeitliche Änderung ist jedoch eher als stützender Befund in Ergänzung zu anderen Faktoren zu sehen.

Biochemische Auswertung

Äußere Belastungen führen zu mehr oder minder starken Reaktionen des Körpers, welcher sich auf die veränderten Umgebungsbedingungen anzupassen versucht. Zur Regelung der Körperfunktionen werden dabei auch verschiedene Stoffe, wie z.B. Adrenalin oder Hormone ausgestoßen oder deren Produktion gehemmt. Diese Stoffe lassen sich zur Belastungszeit im Blut oder Urin der Person nachweisen.

Vivoli et al. (1993) haben Untersuchungen zur Auswirkung von Stress auf LKW-Fahrer bei Langstreckenfahrten durchgeführt. Sie untersuchten neben der Herzrate auch den Gehalt an Cortisol und Katecholaminen im Urin. Dabei zeigten sich nachweisbare Zusammenhänge zwischen den Stoffkonzentrationen und äußeren Belastungsänderungen beim Fahren. Die Erfassung ist jedoch sehr aufwendig. Eine Cortisolmessung aus dem Speichel der Versuchspersonen ist einfacher möglich, kann den Beanspruchungszustand allerdings ebenfalls nur punktuell wiedergeben.

3.3 Zusammenfassung

Kapitel 3 zeigte die Identifikation relevanter Merkmale für die individuelle Routenberechnung auf. Neben der Darstellung der Auswahl streckenrelevanter Merkmale wird auch die Auswahl personenrelevanter Merkmale aufgezeigt.

Anhand ausgewählter Projekte wurde die Umsetzung von Typisierungen in Bezug auf die zugrundeliegenden Fragestellungen exemplarisch aufgezeigt. Dabei wurden in den angeführten Studien im Hinblick auf eine Fahrertypisierung demografische, fahrdemografische und motivbasierte Kennzahlen ebenso verwendet wie soziologische und fahrverhaltensspezifische Aspekte. Je nach Gegenstand der Studie erfolgte dabei eine Auswahl oder Kombination von Unterscheidungsmerkmalen zur Identifizierung relevanter Fahrertypen.

Für die im Zuge dieser Arbeiter vorgesehene Umsetzung einer Fahrertypisierung auf Basis eines Fragebogens bietet sich demnach eine kombinierte Auswahl an demografischen, fahrdemografischen und motivbasierten Kennzahlen an. Aufbauend auf diesen Informationen erfolgt in Kapitel 5 die Erstellung eines Fragebogens.

Des Weiteren wurden physiologische Kennzahlen und deren Erhebungsmethoden vorgestellt. Es erfolgte ebenfalls eine Abschätzung der Verwendbarkeit der einzelnen Kennzahlen für die im Rahmen der vorliegenden Arbeit angestrebte Individualisierung der Routenplanung. Auf der Grundlage der in Kapitel 3 berichteten Befunde wird die Herzrate als physiologisches Maß der objektiven Beanspruchungsmessung wegen der robusten Messbarkeit und guten Interpretierbarkeit für die Umsetzung in dieser Arbeit gewählt.

Abschließend sei zu erwähnen, dass sich sowohl subjektive als auch objektive Datenerhebungsmethoden je nach Gegenstand der Untersuchung eignen können. Dabei muss stets eine

Abwägung der Vor- und Nachteile erfolgen, welche die jeweiligen Methoden mit sich bringen. Im Zuge der zugrundeliegenden Arbeit werden daher zunächst beide Ansätze weiter verfolgt. Eine abschließende Beurteilung der Verwendbarkeit wird am Ende der korrespondierenden Kapitel 5 und 6 ausgeführt.

4 Konzept und Auswirkungen der individualisierten Routenplanung

Um in einer Zeit des stetig wachsenden Verkehrsaufkommens das Fahren sicherer und einfacher zu gestalten, müssen Fahrerassistenzsysteme entwickelt werden, welche den Fahrer entsprechend seiner Fähigkeiten, Fertigkeiten und Bedürfnisse unterstützen.

Durch eine persönlich angepasste Routenplanung ergibt sich eine Streckenführung, welche dem Fahrer und seinem aktuellen Zustand dienlich ist. Als individuell belastend empfundene Verkehrssituationen in Bezug auf zugrundeliegende Verkehrsinfrastrukturen, wie bestimmte Kreuzungstypen oder kurze Auffahrten auf Autobahnen, können bei der Routenplanung berücksichtigt, bzw. vermieden werden. Das individuelle Gefährdungspotential wird verringert, was in der Folge auch eine Verringerung des allgemeinen Verkehrsrisikos mit sich führt. Dass es diesen Einfluss der befahrenen Infrastruktur auf den Fahrer gibt, wird unter anderem durch eine Studie von Kantowitz und Simsek (2001) belegt.

Wagner (1999) zeigte, welchen Einfluss die variierende Infrastruktur auf die Erfüllung von Fahraufgaben im Bereich von Landstraßen besitzt. Dabei wurden auch physiologische Daten, wie Herzrate, Lidschlussfrequenz und durchschnittliche Geschwindigkeit gemessen und aus diesen wurde auf die Belastung des Fahrers beim Bewältigen der Fahraufgaben in bestimmten Streckenabschnitten geschlossen.

Rataj und Vollrath (2006) untersuchten das Belastungspotential in Kreuzungssituationen mittels Simulator und Fahrten im realen Verkehr. Die Überschaubarkeit der Kreuzungssituation bildet demnach einen besonderen Prädiktor für die auftretende Fahrerbelastung.

Die schweizerische Beratungsstelle für Unfallverhütung (BFU) hat ein Verfahren entwickelt, welches bei der Sicherheitsanalyse von Straßenabschnitten neben den verkehrstechnischen Aspekten auch verkehrspsychologische Faktoren einbezieht (Allenbach et al., 1993). Die Erwartung eines ganzheitlichen Ansatzes wurde jedoch hier nicht erfüllt, so dass die Bewertung in beiden Fachbereichen getrennt erfolgt. Der Einfluss der lokalen, streckengebundenen Eigenschaften auf die Sicherheit wird in der Studie jedoch sehr anschaulich gezeigt.

Neben der Straßengeometrie besitzen auch situative Faktoren einen belastenden Einfluss auf den Fahrer, welcher sich individuell in der Beanspruchung niederschlägt (Benda et al., 1983; Richter et al., 1996; Richter et al., 1998; Schießl et al., 2006). Diese Einflussfaktoren können einerseits sowohl mit der befahrenen Infrastruktur zusammenhängen, wie zum Beispiel einem Autobahnzubringer während des Berufsverkehrs. Andererseits können sie auch im Bezug zum Fahrer stehen, was unter anderem den derzeitigen Fahrerzustand oder seine Begleitsituation betrifft.

Ein Vorteil der personalisierten Routenplanung liegt in der Tatsache, dass aufgrund der unterschiedlichen Fahrereigenschaften eine größere Varianz der berechneten Strecken zwischen zwei Orten auftritt. Aufgrund der derzeit berücksichtigten Parameter bei der Routenberechnung variieren die berechneten Strecken bei Nutzung unterschiedlicher Geräte nicht oder nur

geringfügig. Die Einführung besser differenzierender Gewichtungsfaktoren führt nun zu einer stärkeren Varianz an Strecken. Als Resultat verteilt sich der Verkehr besser auf die vorhandene Verkehrsinfrastruktur. Eine von außen gesteuerte Verkehrslenkung, welche bei entsprechender Qualität sehr aufwendig und kostenintensiv ist, wird damit in gewissem Maße obsolet, da die Varianz der vorgeschlagenen Routen direkt mit der persönlichen Varianz der Personen zusammenhängt (Ehrenpfordt & Rataj 2005c). Dieser Verteilungseffekt besitzt einen großen Nutzen, wenn eine Umleitungsempfehlung aufgrund von Verkehrsstörungen berechnet werden soll. Der neue Ansatz führt dann dazu, dass sich der Verkehr selbstständig optimaler verteilt, ohne lenkende Eingriffe von Verkehrsmanagement- oder Verkehrsleitzentralen. Auch auf den klassischen Umleitungsstrecken sollte sich eine deutliche Entspannung der Verkehrslage ergeben, da diese nicht wie bisher von den meisten Fahrern genutzt werden (Ehrenpfordt & Rataj, 2005b).

Die Anwohner klassischer Umleitungsstrecken erfahren eine geringere Belastung durch Lärm- und Abgasemissionen, besonders Emissionsspitzen können abgemindert werden. Als Resultat erhöht sich ebenfalls die Lebensqualität der Anwohner der stark befahrenen Umleitungsstrecken (Ehrenpfordt & Kullack, 2006).

Aufgrund der Berücksichtigung persönlicher Präferenzen und Eigenschaften der Fahrer ist auch mit einem Anstieg der Akzeptanz der Routenempfehlungen zu rechnen. Im Idealfall sollen die vorgeschlagenen Routen von ihrem Charakter her denen entsprechen, die ein Fahrer in einer bekannten Umgebung selbst wählt. Gewohnte Straßengeometrien und Verkehrssituationen sollen somit eine stärkere Berücksichtigung erfahren.

Neben den allgemeinen Vorteilen für die einzelnen Fahrer durch Senkung der Belastung bietet die individuelle Navigation auch Einsatzmöglichkeiten im Bereich der Ausbildung und des Trainings von Fahrern. Ein wichtiger Aspekt der zugrundeliegenden Anpassung einer Routenplanung kann nicht nur in der Vermeidung von individuell kritischen Situationen liegen, die neue Routenplanung soll solche Situationen auch gezielt in die Route eines Fahrers einbeziehen. Fahranfänger und Personen, welche längere Zeit nicht gefahren sind, können dann im Bereich ihrer persönlichen Defizite durch gezieltes Training Erfahrungen aufbauen, was sowohl ihre persönliche als auch die allgemeine Fahrsicherheit steigert.

Dies kann beispielsweise geschehen, um jüngere Fahrer durch eine stufenweise Steigerung des Schwierigkeitsgrades potentiell kritischer Verkehrsinfrastrukturen langsam an diese zu gewöhnen. Nach dem Erwerb neuer Klassenerlaubnisse beim Führerschein, z.B. LKW-Führerschein, können die Fahrer durch eine schrittweise Anhebung des Schwierigkeitsgrades der zu befahrenden Strecken mit dem neuen Fahrzeug trainiert werden (Ehrenpfordt & Eggert, 2007). In Analogie zur Ausbildung von Privatpiloten kann hier ein Teil der Ausbildung eigenverantwortlich vom Fahrer ausgeführt werden, ohne dass sich ein Fahrlehrer im Fahrzeug befinden muss.

An dieser Stelle bleibt allerdings anzumerken, dass eine persönlich angepasste Routenplanung nur dann sinnvoll ist, wenn die Fahrtzeit keinen limitierenden Faktor darstellt. Im Allgemeinen kann davon ausgegangen werden, dass für die individuell angepasste Streckenführung mehr Zeit benötigt wird als bei der schnellsten Streckenführung. Zur Berechnung der schnellsten

oder auch der kürzesten Route reichen derzeit erhältliche Navigationsverfahren und -systeme aus.

4.1 Einflüsse auf den Beanspruchungszustand

Die Grundlage für eine individuell angepasste Routenplanung bildet das erfasste Belastungs- bzw. das Beanspruchungsniveau. Durch die Messung der physiologischen Daten eines Fahrers im Kontext einer bestimmten Verkehrsinfrastruktur kann auf das vorliegende Beanspruchungsniveau geschlossen werden. Das in Kapitel 1.2.2 angeführte Gesetz von Yerkes und Dodson beschreibt dabei die Zusammenhänge zwischen dem Beanspruchungsniveau einer Person und seiner potentiell erbringbaren Leistung. Ein mittleres Beanspruchungsniveau führt dabei zu optimalen Leistungen (Yerkes & Dodson, 1908). Unter- und Überforderungen führen zu vergleichsweise schlechteren Leistungen aufgrund von Unaufmerksamkeit bzw. dem Übersehen oder nicht Berücksichtigen wichtiger Faktoren. In Abbildung 18 wurde dieses Schema nach Yerkes und Dodson in verschiedene Bereiche eingeteilt, welche die angestrebten Einsatzgrenzen der individuellen Navigation aufzeigen.

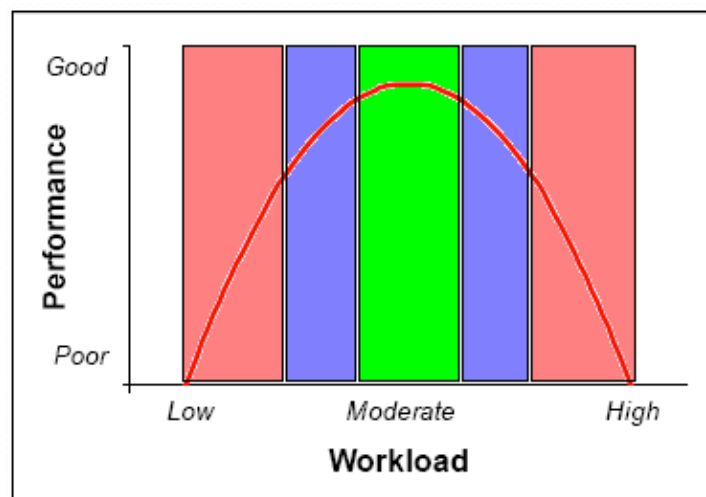


Abbildung 18: Modifiziertes Yerkes-Dodson-Gesetz (Ehrenpfordt & Eggert, 2007)

Zunächst zeigt die farbliche Hinterlegung die generell zu meidenden Beanspruchungsbereiche in Rot. Das grüne Band in der Mitte stellt den Optimumsbereich dar. Eine blaue Hinterlegung indiziert die beiden Bereiche, in welchen die Fahrerbelastungen bei Einsatz der individuellen Navigation zu erwarten sind. Sie liegen in Bereichen, in welchen trotz einer nicht optimalen Beanspruchung immer noch mit einer guten Leistungsfähigkeit gerechnet werden kann.

Die bei einer entspannten Streckenführung auftretende, leichte Unterforderung des Fahrers aufgrund der Vermeidung potentiell gefährdender Situationen muss bei der Systemgestaltung noch zu einer akkuraten Performanz des Fahrers führen. Der linke blaue Bereich ist dabei nicht zu verlassen. Schultz und Schultz (2003) schreiben hierzu in ihrer Arbeit, dass auch ein im Vergleich zum individuellen Optimum geringeres Stressniveau motivierend wirken kann. Dass eine starke Unterforderung zu einem Anstieg des Risikopotentials führt, belegt unter anderem Cohen (1996).

Im Trainingsmodus wird es dahingehend eher zu einer geringfügigen Überforderung des Fahrers kommen, wobei aber der rechte blaue Bereich nicht zu verlassen ist. Damit einhergehend ist eine gute Basis, nämlich ein hohes Arousal, für eine gute Lernfähigkeit gegeben (Carlson, 2004).

Nach Rohmert et al. (1973) sollte außerdem berücksichtigt werden, dass eine im Feldversuch gemessene Beanspruchung im Allgemeinen zur Unterschätzung der Belastung führt. Dieser Effekt muss ggf. berücksichtigt werden.

4.2 Integration in das bestehende Navigationssystemkonzept

Die in dieser Arbeit vorgenommene Anpassung einer Routenplanung soll sich in die bestehenden Strukturen von Navigationssystemen bestmöglich einpassen. Die bestehende Auswahlmöglichkeit *Kürzeste Route* und *Schnellste Route* bei herkömmlichen Navigationssystemen wird im Zuge der Umsetzung einer individualisierten Navigation entsprechend erweitert. Einige auf dem Markt befindliche Applikationen bieten zusätzlich eine Kombination von schnellster und kürzester Route an, welche zumeist als *Optimale Route* oder ähnlich bezeichnet wird. Je nach Auslegung kann der Nutzer dabei auch das Gewicht der beiden Anteile variieren. Über Optionen können außerdem bestimmte Wegetypen, z.B. bemaute Straßen, gemieden werden. Aus historischen Messwerten berechnete Tagesganglinien können mittlerweile ebenfalls in die Routenberechnung einfließen. Im Allgemeinen handelt es sich bei den Erweiterungen um Anpassungen der beiden übergeordneten Routenplanungsoptionen *Kürzeste Route* und *Schnellste Route*.

Die neue Auswahl an Routenplanungsoptionen sollte in einem Navigationssystem übersichtlich und intuitiv bedienbar sein. Dazu ist eine Aggregation von Nutzergruppen mit gleicher Fahrtintention notwendig. Ebenfalls ist eine passende Namensgebung wichtig, welche direkte Assoziationen ermöglicht.

In Abbildung 19 ist dargestellt, wie sich die individuelle Navigation von der Auswahl der Routen her in die Grundauswahl eines herkömmlichen Navigationsgerätes einbinden lässt.

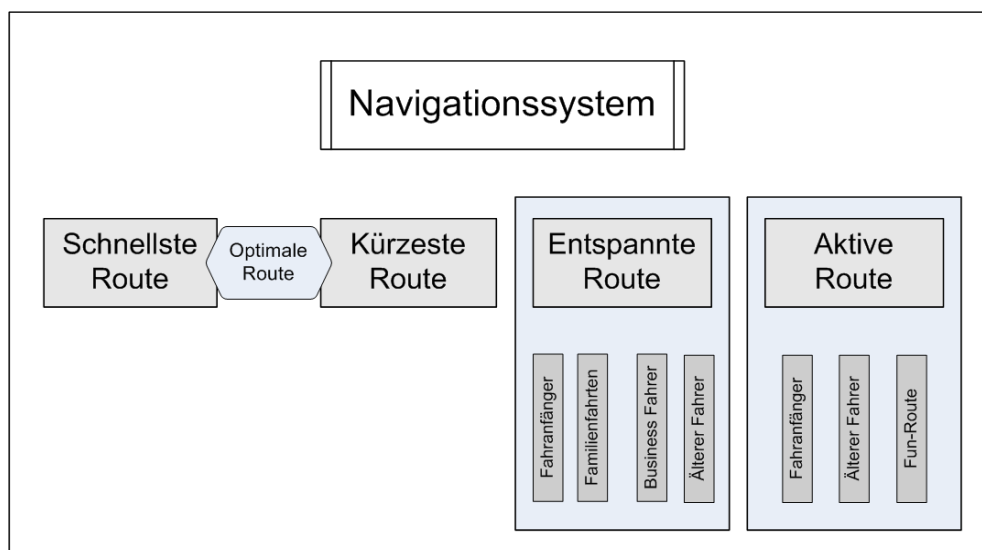


Abbildung 19: Einbindung der neuen Optionen in bestehende Navigationssysteme

Die explizite Zuordnung von einzelnen *Fahrertypen*, wie z.B. *Ältere Fahrer*, erfolgt in Abbildung 19 ausschließlich aus Darstellungsgründen. Man kann diese Zuordnungen aufgrund der präjudizierenden Aussage nicht in einem Produkt oder einem Demonstrator anführen. Angezeigt werden später nur die übergeordneten Begriffe *Entspannte Route* und *Aktive Route*.

Die **Entspannte Route** spiegelt den Bereich wider, in welchem Vermeidungsstrategien angewendet werden, um dem Fahrer eine möglichst entlastende Streckenführung zu bieten. Neben den dafür charakteristischen, allgemeinen Fahrertypen wie *Fahranfänger* und *Ältere Fahrer* profitieren auch Nutzer aus dem Kontext *Familienfahrten* und *Business Fahrer* davon. Die Verringerung der äußeren Belastung soll dem Fahrer mehr mentale Ressourcen freigeben. Hierbei wird das Fahren eher als Mittel zum Zweck genutzt.

Unter dem Begriff **Aktive Route** wird der Bereich Training und Fahrspaß subsumiert. Die vom System als potentiell kritisch detektierten Infrastrukturen eines Fahrers werden bei diesem Trainingsmodus genutzt, um ihm eine Verbesserung seiner Fahrfertigkeiten durch gezieltes Üben der für ihn problematischen Situationen zu ermöglichen.

Diese Optimierung gewährleistet durch ihre charakteristische Verknüpfung von belastenden und entlastenden Streckenabschnitten eine abwechslungsreiche Route. Nutzer mit einer Neigung zu einem bewussten, auslebenden Fahrbedürfnis können diese Option ebenfalls nutzen und erhalten damit eine abwechslungsreich gestaltete Streckenführung, welche ein aktives Ausleben und damit mehr Fahrspaß ermöglicht.

Die in Abbildung 19 genutzte Namensgebung der Nutzertypen ist zur kontextorientierten Gruppierung der Fahrer in Bezug auf das wichtigste Entscheidungskriterium der einzelnen Fahrt angeführt und besitzt daher einen pauschalisierenden Charakter. Die Gruppenzuordnung bezieht sich dabei auf einzelne Fahrten. Personen können je nach Fahrtzweck unterschiedlichen Gruppen zugeordnet werden.

4.3 Voraussetzungen für eine Umsetzung

Für eine Umsetzung der individualisierten Routenplanung sind neben den Hauptkriterien auch die entsprechenden Randbedingungen zu beachten. Es müssen Methoden ausgewählt und/oder entwickelt werden, welche eine robuste und valide Umsetzung ermöglichen. Die folgenden Kapitel nehmen sich diesem Thema an.

4.3.1 Bedingungen der Erhebung

Die Ausgangssituation und der Nutzen der Umsetzung einer individuellen Routenplanung ist in den vorangegangenen Kapiteln dargelegt worden. Eine grundlegende Entscheidung, ob die detektierten Problembereiche der einzelnen Fahrer vermieden oder bewusst mit einbezogen werden sollen, fällt der Fahrer selbst. Eine Automatisierung dieses Aspekts wird als sehr aufwendig angesehen und steht damit nach jetzigem Stand in keinem Verhältnis zu dem erzielbaren Nutzen. Als Hauptproblem wird hierbei eine falsche Zuordnung gesehen, da die Ent-

scheidung der Routenoption zu Beginn einer Fahrt angegeben werden muss und zu diesem Zeitpunkt die Datenlage für eine automatisierte Zuordnung fehlt, bzw. zu gering ist.

Eine Ermittlung individuell belastender Streckenabschnitte, und deren Subsummierung zu charakteristischen Fahrsituationen, sollte während des Fahrens kontinuierlich von einem System im Fahrzeug ermittelt werden. Da es bislang keine Messung physiologischer Daten in handelsüblichen Fahrzeugen gibt, wurden die für die Durchführung der vorliegenden Arbeit notwendigen Fahrten mit dem Versuchsfahrzeug ViewCar® des Instituts für Verkehrssystemtechnik am Forschungsflughafen Braunschweig durchgeführt.

Vor einer sinnvollen Nutzung der neuen Routenplanungsoptionen müssen Versuchsfahrten mit ausreichender Dauer mit dem potentiellen Nutzer durchgeführt werden, damit ein belastbares Nutzerprofil erstellt werden kann. Bei dauerhafter Nutzung sollte eine ständige Erhebung der notwendigen physiologischen Daten im Fahrzeug durchgeführt werden, um der individuellen Entwicklung des Fahrers gerecht zu werden, und das Fahrerprofil aktuell zu halten.

Dieses Problem könnte übergangsweise durch eine Typisierung mittels Selbstauskunft gelöst werden. Hierbei ist allerdings nicht von einer hohen Systemqualität und dauerhaften Akzeptanz auszugehen. Die mit der Erhebung von Informationen mittels Fragebogen verbundenen Ungenauigkeiten müssen in Kauf genommen werden, damit eine Umsetzung erfolgreich durchgeführt werden kann.

Die im folgenden Kapitel 4.3.2 als Beispiel angeführte Studie von Tränkle und Metker (1992) beschäftigt sich mit einer solchen Typisierung anhand der Selbsteinschätzung von Fahrern. Im Fokus stehen dabei die Vermeidungsstrategien älterer Fahrer.

4.3.2 Beispielhafte Darstellung einer Fragebogenstudie

An der von Tränkle und Metker (1992) durchgeführten Studie nahmen ca. 550 Probanden teil. Die Aufgabe des Fahrzeugführens wurde von den Autoren in eine Reihe von Teilaufgaben untergliedert, um differenzierter die Leistungsfähigkeit beurteilen zu können. Die Fahrer sollten dann anhand eines Fragebogens einschätzen, wie gut oder schlecht sie mit Fahr- bzw. Manövrieraufgaben zurechtkommen.

Das Ergebnis der Studie zeigt, dass das Lebensalter der Versuchspersonen fast ausnahmslos mit einer erlebten schlechteren Bewältigung der einzelnen Aufgaben einhergeht. Dabei wurden mit steigendem Alter insbesondere Manövrieraufgaben (*Rückwärtsfahren, Wenden*), Aufgaben in dichtem Verkehr und in Kreuzungen sowie Aufgaben mit erschwerten Bedingungen, z.B. schlechte Sicht als schwierig angegeben. Als nicht problematisch wurden die Aufgaben: *Reinkommen, Vorbeikommen* und *Herauskommen* bewertet.

In Ihrem Ausblick führen die beiden Autoren dabei an: „Die insbesondere für ältere Autofahrer erheblichen erlebten Schwierigkeiten in Kreuzungssituationen und Situationen mit dichtem Verkehr könnten möglicherweise dadurch vermindert werden, dass die Fahrer in diesen Situationen von zusätzlichen Orientierungs- bzw. Navigationsnotwendigkeiten befreit werden. Dafür bieten sich Fahrernavigations- und -leitsysteme an.“ (Tränkle & Metker, 1992, S. 61)

4.3.3 Vermeidungsstrategien und individuelle Leistungsfähigkeit

Vermeidungsstrategien bilden eine grundlegende Komponente bei der Umsetzung einer individualisierten Routenplanung, da sie hinreichend Potential für eine Sicherheitsverbesserung bieten. Diese Strategien entwickeln die Fahrer selbstständig aufgrund der eigenen Einschätzung und Präferenzen. Der zugrundeliegende Vorgang kann sowohl bewusst als auch unbewusst ausgeführt werden. Grundlage sind dabei limitierende Fähigkeiten und Fertigkeiten der Fahrer.

Während Fahranfänger zumeist Probleme mit der Einschätzung von Geschwindigkeiten anderer Fahrzeuge besitzen, weil sie diese unterschätzen, reagieren ältere Fahrer eher langsamer und schätzen daher die Geschwindigkeiten anderer zu hoch ein. Dasselbe trifft auf die Beurteilung von Entfernungen zu. Hier werden die Abstände von den jüngeren Fahrern eher zu groß und von den älteren eher zu gering eingeschätzt. Die hier angeführte Separierung soll lediglich die Problematik verdeutlichen, die realen Unterschiede sind wesentlich diffiziler.

Das Vermeidungsverhalten bei potentiellen Gefahrensituationen wurde beispielsweise von Fuller untersucht (Fuller, 1984).

Jüngere Fahrer

Den Fahranfängern mangelt es zumeist an Fahrerfahrung, die Fertigkeit des Fahrzeugführens ist nur ungenügend ausgeprägt. Dass diese mangelnde Fertigkeit der schwerwiegendste Grund für die Unfälle der Fahranfänger ist, belegen unter anderem Studien von Mayhew und Simson (1995). Probleme in der Längs- und Querführung, bei Mehrfachaufgaben und hinsichtlich der visuellen Orientierung führen demnach zu den meisten Schwierigkeiten.

Rasmussen (1986) sowie Leutner und Brünken (2002) sehen in dem fehlenden Fertigniveau ebenfalls die Hauptursache für Unfälle. Die von ihnen beschriebene Entwicklung des Fertigniveaus zeigt die Abbildung 20.

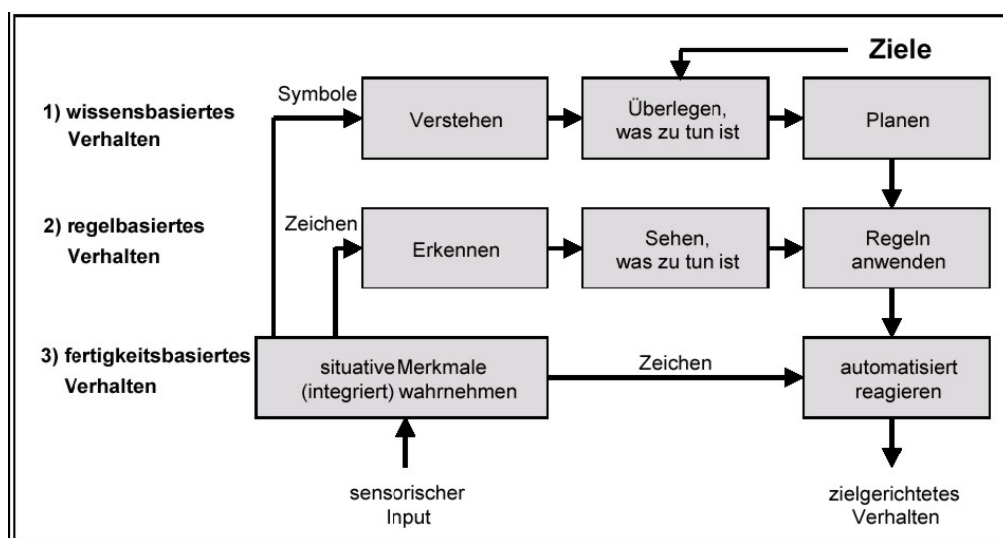


Abbildung 20: Erwerb von Fahr- und Verkehrsexpertise nach Rasmussen (1996)

Die Phase 1) bildet die Ausgangslage eines Fahranfängers, wobei er alle Eindrücke einzeln verstehen und verarbeiten muss. Diese Phase wird mit dem wissensbasierten Verhalten in Bezug gebracht. In Phase 2) erfolgt bereits eine Verknüpfung von Handlungen zu Abläufen. Dies wird als regelbasiertes Verhalten bezeichnet. In Phase 3) werden die Abläufe und Handlungen bereits automatisiert. Das grundlegende Verhalten ist gefestigt, so dass sich der Fahrer besser auf Situationen mit einem höheren Gefährdungspotential konzentrieren kann. Dies wird als fertigkeitbasierte Ebene bezeichnet.

Neben den Fahrfertigkeiten besitzt nach Schulze (1998) auch der Lebensstil einen direkten Zusammenhang mit dem Fahrverhalten. In zwei Befragungsstudien aus den Jahren 1989 und 1991 wurde nach einer Korrelation zwischen Lebens- und Freizeitstil und der verkehrsbezogenen Einstellung sowie einer Verwicklung in Unfälle geforscht. Dabei wurden eindeutige Zusammenhänge zwischen den vorgenannten Eigenschaften gefunden. Bestimmte psychologische und soziodemografische Indikatoren konnten separiert werden, mit welchen eine Zuordnung zu den Risikogruppen möglich ist. Es handelt sich dabei zum Beispiel um die Risikodeterminanten: Alkoholkonsum, Anzahl nächtlicher Freizeitfahrten und die Tendenz zur Nutzung des Fahrzeugs als Statussymbol. Die Gruppen aus der Studie weisen allerdings eine sehr heterogene Zusammensetzung auf.

Den fahrinduzierten Stress bei College Studenten in den USA haben Rasmussen et al. (2000) untersucht. Dabei wurde der Vergleich zu anderen Belastungssituationen wie Prüfungen per Fragebogenuntersuchung hergestellt.

Dass das Unfallrisiko innerhalb der ersten 9 Monate nach Erwerb des Führerscheins auf die Hälfte des Ausgangsrisikos sinkt wird unter anderem bei Leutner und Brünken (2002) angeführt. Dies ist ebenfalls auf den Zugewinn an Fahrfertigkeiten zurückzuführen.

Um das Risikopotential der jungen Fahranfänger zu mindern, wurde unter anderem das Modellkonzept „Begleitendes Fahren ab 17“ auf dem 41. Verkehrstag 2003 in Goslar vorgestellt. Dabei darf ein Fahrschüler bereits mit 17 Jahren eine vollständige Fahrprüfung ablegen, bis zu seiner Volljährigkeit jedoch nur in Begleitung eines älteren Fahrzeugführers fahren. Er übernimmt allerdings ab der Ausstellung des Führerscheins die Position des verantwortlichen Fahrzeugführers, wenn er ein Fahrzeug fährt (Projektgruppe Begleitendes Fahren, 2003). Ähnliche Versuche mit positiven Auswirkungen auf die Unfallzahlen wurden bereits in den 90er Jahren in Schweden durchgeführt (Gregersen et al., 1999).

Zusammenfassend resultieren die meisten Probleme jüngerer Fahranfänger aus der fehlenden Praxiserfahrung. Hier kann eine individualisierte Routenplanung einen Beitrag zum sicheren Aufbau von Fahrerfahrung leisten, indem anspruchsvolle Infrastrukturkombinationen gezielt und mit abgestuften Schwierigkeitsgraden trainiert werden können. Durch den damit verbundenen Aufbau von Fahrerfahrung wird die Fertigkeit immer weiter perfektioniert und das Risiko eines Unfalls verringert sich.

Ältere Fahrer

Bei den älteren Fahrern treten zumeist erste Einschränkungen im Bereich der Fähigkeiten auf. Aufgrund des biologischen Alters und der durchlebten Krankheiten und äußeren Einflüsse auf den Menschen verschlechtern sich bestimmte Sinnesleistungen. Dies schlägt sich zum Teil in dem Eigenbild der Fahrer wieder, weshalb diese mehr oder minder starke Vermeidungsstrategien entwickeln (Baltes & Baltes, 1989).

Diese Vermeidungsstrategien beziehen sich zumeist auf bestimmte Fahraufgaben und Situationen, welche im Kontext einer korrespondierenden Infrastruktur auftreten. Dazu gehören Linksabbiegevorgänge, Spurwechsel, Fahrten auf Autobahnen, durch komplexe Kreuzungen und im dichten Verkehr. Nach Hennessy (1995) und Brouwer, Rothengatter und Wolfelaar, (Brouwer et al., 1991a) bedeutet dies eine höhere Anspannung für ältere Fahrer.

Äußere Einflüsse wie Dunkelheit und schlechte Witterung, aber auch Fahrten zu den Hauptverkehrszeiten werden nach Planek, Condon & Fowler (1968) sogar direkt gemieden.

In einer Fragebogenstudie von Baldock et al. (2006) wurden die Fahrgewohnheiten und Einstellungen von 104 Versuchspersonen zwischen 60 und 92 Jahren erhoben. Zur Stützung der subjektiven Daten wurden an 90 Versuchspersonen Fahrttests durchgeführt, um das Vermeidungsverhalten zu prüfen. Es zeigte sich, dass zwischen der Fahrfähigkeit und dem allgemeinen Fahrvermeiden keine signifikante Korrelation nachweisbar war. Bei speziellen Situationen wie Nacht- oder Regenfahrten war hingegen eine Korrelation zwischen der Fahrfähigkeit und der Vermeidung dieser Situationen erkennbar. Das Vermeidungsverhalten älterer Fahrer ist nach dieser Studie also nur in wenigen, spezifischen Situationen nachweisbar.

Die Begleitsituation, also das Fahren in Begleitung anderer Personen, spielt nach Ball, Owsley, Stalvey, Roenker & Graves (1998) und Owsley, Stalvey, Wells & Sloane (1999) insoweit eine Rolle, als dass sie von den Fahrern als wenig schwierig eingeschätzt und daher selten gemieden wird. Die Umsetzung von Vermeidungsstrategien wurde für Straßen mit hoher Verkehrsdichte und Einzelfahrten als sehr schwierig eingestuft. Fahrten in der Hauptverkehrszeit oder seitliches Einparken wurden dagegen als sehr einfach zu vermeiden angesehen.

In direktem Zusammenhang zu den Vermeidungsstrategien ist auch die soziale Situation der älteren Fahrer zu sehen. Nach Owsley et al. (1999) gaben 70% der Fahrer an, dass sie ihren Lebensstil aufrecht erhalten wollten. 44% der Befragten wollten außerdem nicht Angehörige darum bitten, sie zu fahren.

Die Vermeidungsstrategien beziehen sich im Wesentlichen auf Situationen, in welchen schnelle Reaktionen häufig oder sehr wahrscheinlich gefordert sind. Die Strategien ermöglichen es also, bei nicht allzu starker Beeinträchtigung der Fähigkeiten, die Aufgabe des Fahrzeugführers länger erfolgreich zu bewältigen, ohne das Unfallrisiko wesentlich zu erhöhen.

Nach Vance et al. schränken viele ältere Fahrer absichtlich ihr Fahren ein, da sie sich der Schwierigkeit und des Unfallrisikos bewusst sind, und sie versuchen, dieses zu minimieren (Vance et al., 2006). Rimmö und Hakamies-Blomqvist (2002) geben eine ähnliche Einschätzung ab. Eine gezielte Einschränkung auf Fahrten, welche nach eigener Einschätzung der älteren Fahrer nicht mit Unsicherheit verbunden sind, wird bei Langford und Koppel (2006) angeführt.

Reschnar und Schlag (2002) haben ein Modell der „Selektiven Optimierung“ mit Kompensation (SOK) entwickelt, um altersunabhängige Adaptionstrategien beschreiben zu können. Vornehmlich werden diese jedoch von älteren Fahrern genutzt.

Ball et al. (1998) berichten allerdings auch von einer Resistenz gegenüber solchen selbst einschränkenden Vermeidungsstrategien.

Das von Navigationssystemen ausgehende Potential für ältere Fahrer wurde von Pohlmann (1994) untersucht. Dass hierbei auch Hürden zu überwinden sind, stellt er ebenfalls fest. Er kommt letztendlich zu dem Schluss: „Die Zielführung sollte nach individuellen Optimierungsstrategien veränderbar gestaltet werden, um verschiedenen Fahrtzwecken der Benutzer gerecht zu werden.“ (Pohlmann, 1994, S. 303).

Der potentielle Nutzen einer angepassten Streckenführung wurde 2006 in einer Studie im Rahmen einer Diplomarbeit aufgezeigt (Kullack, 2006; vgl. auch Lemmer et al., 2006).

5 Subjektive Daten zur individualisierten Streckenbewertung

Die individualisierte Anpassung der Fahrtroute sollte auf Basis der Belastungspotentiale, resultierend aus der befahrenen Infrastruktur, berechnet werden.

Wie in Kapitel 4.3 bereits angeführt, ist derzeit keine Belastungsmessung in Form physiologischer Daten in Serienfahrzeugen verfügbar. Auch in unmittelbarer Zukunft ist nicht mit einer solchen Umsetzung zu rechnen, weshalb zusätzlich neben der Nutzung physiologischer Daten auch eine Typisierung auf Basis von Fragebögen untersucht wird.

Im Folgenden wird zunächst die Entwicklung eines solchen Fragebogens aufgezeigt, wobei die Eigenschaften und Präferenzen von Fahrern erhoben werden. Auf Grundlage der so dokumentierten Unterschiede erfolgt dann die Differenzierung in Basisfahrertypen. Hierzu müssen Variablen identifiziert werden, welche eine Differenzierung optimal ermöglichen. Die Fahrer können dann den Basisfahrertypen auf Grundlage der Variablenausprägung zugeordnet werden.

Für die Entwicklung des Fragebogens wurde eine explorative Vorstudie durchgeführt, welche im folgenden Kapitel näher erläutert wird. Aufbauend auf den Ergebnissen der Vorstudie wurde dann der Fragebogen für die Hauptstudie entworfen. Die Durchführung der Hauptstudie und ihre Ergebnisse werden ebenfalls berichtet.

Des Weiteren wurde der Einsatz eines Fragebogens zur Belastungsermittlung vor, während und nach einer Versuchsfahrt im realen Verkehr untersucht, um eine mögliche Dynamisierung des Fahrerprofils zu erlangen.

5.1 Explorative Identifikation von Fahrerpräferenzen

Die Vorstudie wurde im Frühjahr 2004 mit 30 Versuchspersonen durchgeführt. Ziel dieser Studie war es, die unterschiedlichen Präferenzen von Fahrern zu identifizieren, um anschließend eine Vorauswahl der wichtigsten Variablen durchführen zu können. Ebenfalls wurde der Einsatz von verschiedenen Fragemethodiken untersucht. Erste Ergebnisse präsentierten Ehrenpfordt und Rataj (Ehrenpfordt & Rataj, 2005a).

Die Studie benutzt für einige Bereiche offene Fragen ohne vorgegebene Antworten, um einer Verfälschung der Ergebnisse aufgrund von Vorgaben vorzubeugen. Dabei wurden hauptsächlich die Themen Navigation und Orientierung adressiert. Nach Auswertung der Vorstudie wurden folgende Informationen als Differenzierungskriterien der Fahrer in Fahrertypen ermittelt: *Demografische und fahrdemografische Daten, Navigationspräferenzen sowie Extraversion, Mobilitäts- und Fahrmotive.*

Das Ergebnis dieser Vorstudie zeigt das Potential einer Differenzierung von Personen in Basisfahrertypen in Bezug auf die Navigationspräferenzen auf, wobei dies nur in Bezug auf Fahrten ohne zeitliche Einschränkungen sinnvoll ist (Ehrenpfordt & Rataj, 2005a).

5.2 Fragebogenstudie zur Charakterisierung und Klassifikation von Fahrer- und Fahrsituationstypen

Aufbauend auf den Ergebnissen der Vorstudie, wurde der Fragebogen der Hauptstudie entworfen. Die Studie wurde dann in Form einer betreuten Diplomarbeit im Sommer 2004 durchgeführt und ausgewertet (Hasse, 2005). Der dazu entworfene Fragebogen ist dem Anhang C zu entnehmen.

5.2.1 Versuchsdesign und Durchführung

Wie schon bei dem Fragebogen der Vorstudie wurden einleitend sowohl demografische als auch fahrdemografische Merkmale erhoben. Dazu zählten unter anderem: das Geburtsdatum, das Geschlecht und der Familienstand. Zu den fahrdemografischen Daten gehörten beispielsweise die jährliche Kilometerleistung je Fahrzeugklasse und der Zeitpunkt des Führerschein- bzw. Klassenerwerbs.

Hinzugenommen wurde ein Bereich mit fahrmotivbasierten Fragestellungen, welche in mehreren Dimensionen nach der Einstellung zum Fahren und anderen Merkmalen unterscheidet. Diese Vorgehensweise basiert auf der Studie von Adelt et al. (1997), wobei dort 13 Motive, Gefühle und Einstellungen zum Thema Auto und Autofahren angeführt werden. Die Arbeit von Abendroth (2001), welche eine Typisierung zur Differenzierung von Fahrern in Bezug auf eine Nutzung des ACC-Systems zum Thema hatte, fand ebenfalls Berücksichtigung.

Mit Hilfe eines selbst entwickelten Fragenbereiches, in welchem die Versuchsperson anhand von fotografierten Fahrszenen eine persönliche Rangordnung erstellen musste, sollten die grundlegenden Fahrpräferenzen der Individuen erhoben werden. Hierbei wurden Szenen auf Autobahnen, Landstraßen und Stadtstraßen mit unterschiedlicher Verkehrsbelastung dargestellt.

Ein weiterer, selbst entwickelter Bereich beschäftigte sich mit der Begleitsituation des Fahrers. Hierbei wurde von der Hypothese ausgegangen, dass begleitende Personen sowohl einen positiven als auch einen negativen Einfluss auf den Fahrer und damit auf seine Fahrleistung besitzten können (Ehrenpfordt & Rataj 2005b).

Im Antwortbereich der entsprechenden Fragen wurden die beiden Bedingungen *mit Begleitung* und *ohne Begleitung* nebeneinander gestellt. In diesem zweiteiligen Antwortstil erfolgte die Untersuchung der Themen *Pausengestaltung* und *Umgebungspräferenzen*. Eine weitergehende Unterscheidung nach potentiell belastender und entlastender Begleitung wurde nach sorgsamer Abwägung nicht vorgenommen, um den Gesamtumfang des Fragebogens zu limitieren.

Auf eine Differenzierung nach *unter Zeitdruck* und *ohne Zeitdruck* wurde aufgrund der Ergebnisse der Vorstudie verzichtet. Wie bereits angeführt, unterscheiden sich die Fahrer in ihren Präferenzen nur sehr geringfügig, wenn sie eine Fahrt unter Zeitdruck durchführen müssen. Der limitierende Faktor Zeit ist daher eine gute Abgrenzung zwischen der herkömmlichen Routenplanung im Allgemeinen und einer individualisierten Routenplanung, wie sie in der vorliegenden Arbeit untersucht wird. In Kapitel 7 erfolgt daher ein Vergleich zwischen einer Streckenführung unter der Option *Schnellste Route* und einer unter der Option *Entspannte Route*.

In der dargestellten Fragebogenstudie wurde außerdem auf den Einsatz von offenen Fragen ohne eine Antwortvorgabe aus Gründen der Auswertbarkeit verzichtet.

5.2.2 Auswertung

An der Studie beteiligten sich 264 Personen, was einer Rücklaufquote von ca. 68% entspricht. Das Geschlechterverhältnis war mit 42% Frauen und 58% Männern relativ ausgeglichen. Im Mittel waren die Versuchspersonen 37 Jahre alt ($SD = 13,17$). Ein eigenes Auto besaßen 76% und zur Ausübung des Berufes benötigten 28% einen Führerschein.

Nicht alle der ursprünglichen Fahrmotiv-Dimensionen wurden bei der Auswertung der Studie aufgefunden, was unter Umständen auf den Grad der Homogenität der Versuchspersonengruppe zurückgeführt werden kann.

Die *Statements zum Thema Auto und Autofahren* wurden von 62 Aussagen zu den Themen Fahrmotive, Fahrstile, Emotionen und der Einstellung zum Fahren gebildet. Zusätzliche wurden fünf Aussagen aus dem Bereich *Zielloses Herumfahren* und *Instrumentalität des Fahrens* einer Studie von Kaiser et al. (1994) entnommen, um eine bessere Aussagequalität in diesen Bereichen zu erlangen (Hasse, 2005).

Mittels Faktorenanalyse erfolgte dann die Reduzierung der Anzahl unabhängiger Einflussgrößen. Bei den Items aus dem Navigationsbereich erfolgte eine getrennte Berechnung der Faktorenanalyse nach den Bedingungen *alleine* und *in Begleitung*. Zu berücksichtigen ist, dass die Ergebnisse von Faktorenanalysen auf der Basis subjektiver Annahmen bzw. Entscheidungen gewonnen werden (Backhaus et al., 2000).

Im Zuge der Skalenbildung wurden alle Variablen mit einer Ladung von mindestens 0,3 auf einem Faktor zu einer Skala zusammengefasst. Aus diesen Skalen wurden dann schrittweise Variablen herausgenommen und die Reliabilität mittels Cronbach's alpha überprüft. Erhöhte sich die Reliabilität der Skala, wurde die Variable gelöscht.

Mittels Clusteranalyse wurde dann die Einteilung in, nach außen heterogene und nach innen homogene Fahrertypen vorgenommen. Die Navigationspräferenzen bildeten dabei die Grundlage, während demografische Eigenschaften, fahrdemografische Daten und Fahrmotive als Deskriptionsvariablen eingesetzt wurden.

In einem hierarchischen Verfahren der Clusteranalysen wurde zuerst eine Identifikation von Ausreißern nach dem Cluster-Algorithmus *single linkage* durchgeführt. Dies bezieht sich auf

die Selektion von Versuchspersonen, welche sich durch ihre Eigenschaften stark anders verhalten als die anderen Versuchspersonen der Gruppe. Anschließend wurde durch Einsatz des Ward-Algorithmus die weitere Clusteranalyse durchgeführt. Als Proximitätsmaß wurde in beiden Clusteranalysen die quadrierte Euklidische Distanz verwendet.

Die Analyse der Differenzierungskriterien zwischen den Gruppen erfolgte über eine multivariate Varianzanalyse mit anschließender Diskriminanzanalyse. Dabei wurden die Variablen identifiziert, welche als beste Differenzierungskriterien eine hohe Unterscheidbarkeit der einzelnen Gruppen begründen. Über diese lassen sich die verschiedenen Cluster am besten trennen. Primär wurde dabei nach Differenzierungskriterien aus dem Gebiet der Navigations-Items, demografischer Eigenschaften, fahrdemografischer Daten und der Extraversion gesucht.

Zur Untersuchung der Auswirkung des Begleitaspektes in Bezug auf die Navigations-Items wurde eine multivariate Varianzanalyse mit Messwiederholung gewählt. Im Speziellen handelte es sich um ein mehrfaktorielles multivariates Design, da mehrere unabhängige Variablen vorhanden waren (Brosius, 1989).

Mittels χ^2 -Tests erfolgte der Abgleich zwischen Clusterzugehörigkeit und kategoriellen, demografischen Daten wie Geschlecht oder Familienstand des Begleitumstandes.

Es wurde außerdem nachgeprüft, ob sich die Dimensionen des Fragebogens von Adelt et al. (1997) auch in der vorliegenden Fragebogenstudie finden ließen. Folgende Dimensionen waren auch in der neuen Studie identifizierbar:

- Ängstlichkeit
- Auslebe-Motiv
- Hobby
- Verzichtbereitschaft
- Umwelt-Motiv
- Erregung
- Widerstand gegenüber Vorschriften
- Instrumentalität

Bei den Dimensionen: *Sicherheitsdenken* und *Gleit-Motiv* wurde nur jeweils ein Item identifiziert, welches die Dimension repräsentiert. Innerhalb der neuen Studie war für die Dimensionen: *Prestige*, *Autonomie-Motiv* und *Zielloses Herumfahren* kein Nachweis möglich.

Es ergab sich eine Einteilung in drei Cluster mit 79 Probanden im Cluster 1, 82 Probanden im Cluster 2 und 96 Probanden im Cluster 3. Dabei zeigte sich, dass Cluster 1 und 2 näher beieinander lagen als diese jeweils zu Cluster 3. Abbildung 21 zeigt eine Übersicht über die Eigenschaften der Cluster.

	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3
Geschlechterverteilung (w/m)	44% / 56%	35% / 65%	37% / 63%
Durchschnittliches Alter (Jahre)	40	39	33
Durchschnittliche jährliche Fahrleistung (km/Jahr)	13.937	20329	15262
Durchschnittliche Wunschgeschwindigkeit BAB (km/h)	136	146	143
Streckenführung	überschaubar	Abwechslungsreich	schnell
Vermeidungsverhalten	ausgeprägt	keines	keines
Interesse an Fahrumgebung	keines	ausgeprägt	bedingt
Umweltverträgliches Fahren	ausgeprägt	keines	keines

Abbildung 21: Übersicht demografischer und fahrdemografischer Clustereigenschaften

Die drei gefundenen Cluster lassen sich wie folgt beschreiben: Der **Cluster 1** besitzt einen Vergleichsweise höheren Frauenanteil als die beiden anderen Cluster. In Bezug auf das Alter ist eine breite Streuung vorhanden. Ca. 65% befinden sich im Alter zwischen 25 und 55 Jahren. Im Mittel sind sie signifikant älter als in Cluster 3. Die jährliche Fahrleistung und die bevorzugte Wunschgeschwindigkeit auf Autobahnen sind deutlich geringer als im Vergleich mit Cluster 2.

Die Personen in Cluster 1 sind wesentlich ängstlicher als die in den beiden anderen und zeichnen sich im Vergleich durch eine deutlichere Tendenz zu umweltverträglichem Fahren aus.

In Bezug auf die erhobenen Streckenpräferenzen besitzen sie einen ausgeprägten Wunsch nach einer überschaubaren Streckenführung und Umgehung von z.B. kurvenreichen Strecken, Tunnelfahrten, Linksabbiegen und Kreisverkehren. Diese Tendenz ist nur bei Cluster 1 zu finden. Die Vorstellungen der Personen des Cluster 1 decken sich tendenziell am besten mit einer *Entspannten Route*.

Der **Cluster 2** besitzt einen deutlichen höheren Männeranteil als Cluster 1. Das mittlere Alter ist ähnlich dem von Cluster 1, ebenso wie die Spanne von ca. 65% der zugehörigen Personen, welche sich zwischen 26 und 52 Jahren befindet.

Im Vergleich zu Cluster 1 sind die Personen dieses Clusters im Mittel weniger ängstlich. Sie unterscheiden sich von den Personen in den beiden anderen Clustern durch die Häufigkeit, sich beim Fahren die Gegend anzuschauen.

Eine überschaubare Wegführung ist im Vergleich zu Cluster 1 wesentlich weniger gefragt. Deutlich ausgeprägt ist der Wunsch nach einer abwechslungsreichen Streckenführung, z.B. Autobahn und Landstraße im Wechsel, einer kurvenreichen Strecke oder einer landschaftlich reizvollen Wegführung. Auf diesen Personenkreis passt pauschalisiert am ehesten eine *Aktive Route*.

Ebenso wie Cluster 2 weist der **Cluster 3** einen sehr hohen Männeranteil auf. Das Durchschnittsalter ist deutlich geringer als bei den beiden anderen Clustern. Die Fahrleistung ähnelt der von Cluster 1, wohingegen die Wunschgeschwindigkeit eher zu dem von Cluster 2 passt.

Die Personen in Cluster 3 sind im Vergleich zu denen in Cluster 1 weniger ängstlich und nicht besonders an Umweltschutzaspekten interessiert. Allgemein sind in Cluster 3 keine ausgeprägten Neigungen zur Nutzung abwechslungsreicher oder landschaftlich reizvoller Strecken sowie Umgehungen ersichtlich.

Besonders auffällig ist das Interesse der Fahrer aus Cluster 3 an einer schnellen Streckenführung auch in Verbindung mit einem deutlichen Autobahnanteil. Ebenfalls unterscheiden sie bei den Wegpräferenzen besonders stark, ob sie alleine oder in Begleitung fahren. Dies tritt bei Personen in den beiden anderen Clustern nicht in diesem Maße auf. Hier ist die Tendenz zur Präferenzierung einer *Schnellen Route* erkennbar.

5.3 Belastungsermittlung im Fahrversuch mittels Selbstauskunft

Neben der Verwendung von Fragebögen wurde ebenfalls das Potential der Befragung im Rahmen von Versuchsfahrten untersucht. Vor, während und nach der Absolvierung einer Versuchsfahrt sollten die Probanden Auskunft über den korrespondierenden Belastungszustand geben. Ziel dieses Teilbereichs der Versuchskampagne war die Ermittlung des Potentials der Selbstauskunft für ein differenziertes Fahrermodell. Die Studie wurde entsprechend vorbereitet und im Zuge einer Diplomarbeit durchgeführt (vergleiche hierzu Kullack, 2006)

Der Ansatz zur Identifikation relevanter Infrastruktur wurde auf Basis der Erkenntnisse über Vermeidungsstrategien älterer Fahrer umgesetzt. Die von Fahrern entwickelten Verhaltensmuster zur Umgehung von unangenehmen Situationen spiegeln auch den Bedarf für eine personalisierte Routengenerierung wider. Ältere Fahrer entwickeln zumeist auf Grundlage nachlassender Fähigkeiten Strategien, um Situationen zu umgehen, in welchen sich ihre Probleme negativ auswirken würden. Die Korrelation zwischen aufgezeichneter und angegebener Belastung galt es zu ermitteln.

5.3.1 Versuchsdesign und Durchführung

Im Versuch gab es zwei Probandengruppen: die Älteren Fahrer mit 70 Jahren (+/- 3 Jahre) und die Kontrollgruppe mit 30 Jahren (+/- 3 Jahre). Untersucht wurde die Angabe von Belastungs-

zuständen in Fahrsituationen, worin bestimmte Infrastrukturkombinationen zu durchfahren waren.

Ausgewählt wurden 22 Probanden aus dem Versuchspersonenpool des Instituts für Verkehrssystemtechnik. Aufgrund fehlender Differenzierungen in der Beantwortung des Fragebogens mussten später jeweils drei ältere und drei jüngere Fahrer von der Auswertung ausgeschlossen werden. Beispielsweise gaben diese Versuchspersonen bei allen Streckenabschnitten einen gleichförmigen Belastungswert an, was entweder auf ein fehlendes Differenzierungsvermögen oder eine unzureichende Motivation bei der Mitarbeit zurückzuführen ist. Die ausschlaggebenden Ursachen konnten im Zuge der Studie nicht ermittelt werden.

Vor Fahrtantritt wurden verschiedene demografische und fahrdemografische Informationen von den Probanden erhoben. Ebenfalls wurde der aktuelle Belastungszustand mittels Selbstauskunft erfasst.

Während der Fahrt wurde jeder Proband bezüglich seiner Einschätzung des Schwierigkeitsgrades von elf Situationen vom Versuchsleiter befragt. Die Ergebnisse wurden entsprechend aufgezeichnet und ausgewertet.

Eine Befragung der Probanden nach der Fahrt stellte noch einmal das korrespondierende Belastungspotential von 19 Situationen fest. Um den Fahrern die entsprechenden Situationen am besten in Erinnerung zu rufen, wurde dazu ein Video einer standardisierten Versuchsfahrt vorgeführt, anhand dessen sich die Versuchspersonen orientieren konnten.

Zur Anwendung kam ein Fragebogen mit fahraufgabenrelevanten Items aus dem „Fragebogen zur Arbeitsanalyse“ (Fastenmaier, 1995). Es wurden die Auszüge Sinnes- und Wahrnehmungsprozesse, Beurteilungsleistungen, Denk- und Entscheidungsprozesse und Fahrzeugbedienung ausgewählt, welche anhand einer 15-stufigen Kategorienunterteilungsskala nach Heller (1982) zu beurteilen waren. Dazu musste vom Probanden zuerst in einer fünfstufigen Einteilung eine erste Wertung abgegeben werden, welche anschließend innerhalb dieser Auswahl in drei Tendenzstufen zu differenzieren war. Diese Kategorienunterteilungsskala wurde sowohl im Bereich der Schwierigkeitsbewertung als auch im Fragenteil nach dem persönlichen Befinden angewendet.

Während der Versuchsdurchführung wurde von der Versuchsleiterin bereits bemerkt, dass die Probanden deutliche Probleme bei dieser Art der Bewertung hatten, was in den späteren Auswertungen bestätigt werden konnte.

5.3.2 Auswertung

Die Ergebnisse der Probandenbefragung in Bezug auf schwierige infrastrukturbedingte Fahrsituationen vor, während und nach der Versuchsfahrt wurden verglichen, wobei die Ergebnisse während der Fahrt den höchsten Stellenwert besaßen.

Um eine Differenzierung der Situationen zu erhalten, wurde sowohl für die Gruppe der älteren Fahrer als auch für die Kontrollgruppe ein Mittelwert der angegebenen Beanspruchung berechnet. Anschließend erfolgte eine Ordnung dieser nach Schwierigkeitsgrad. Bei den älte-

ren Fahrern war *Rechtsabbiegen mit Grünpfeil* als leichteste Situation angegeben; *Mehrspuriges Linksabbiegen* als schwierigste Situation.

Bei der Kontrollgruppe wurde als Leichtestes das *Befahren einer einspurigen Straße* genannt, die *Bewältigung eines Autobahnkreuzes* galt als schwierigste Situation.

Die Aussagekraft subjektiver Daten auf Basis von Probandenbefragungen spiegelt sich in der Auswertung der Befragung deutlich wider. Glaubt man den Angaben beim Fragebogen vor Fahrtantritt, so sind die älteren Fahrer in den schwierigen Situationen weniger belastet als die Personen der Kontrollgruppe, was Abbildung 22 zeigt. Bei den leichten Situationen ist kein signifikanter Unterschied zwischen beiden Gruppen ermittelbar.

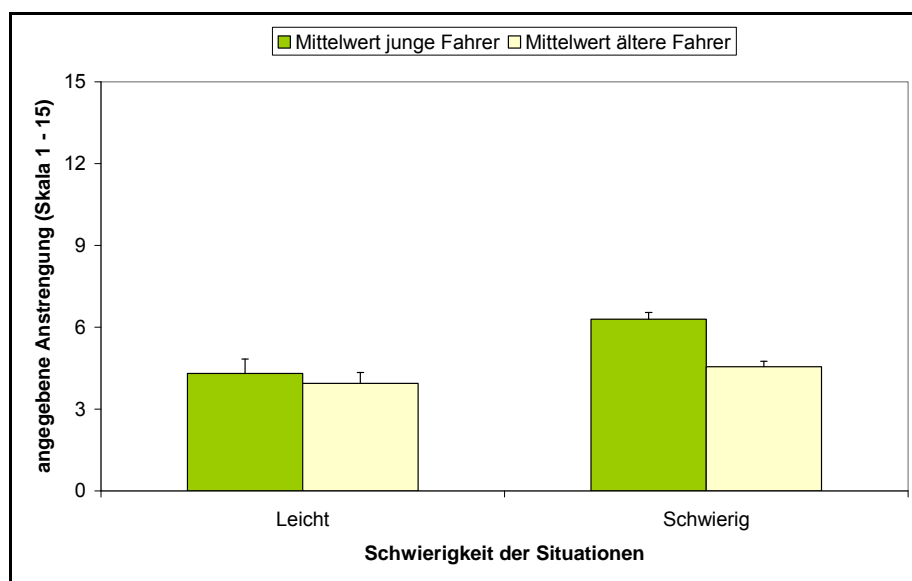


Abbildung 22: Beurteilung der Anstrengung von Verkehrssituationen nach Kullack (2006)
(dargestellt sind Mittelwerte und Standardmessfehler vor der Fahrt)

Die Auswertung der beiden Befragungen während und nach der Fahrt zeigte die gleiche Tendenz des Differenzierungsproblems. Hierbei geben die älteren Fahrer mit nur geringfügiger Abweichung bei den schweren Situationen eine geringere Beanspruchung an als die Kontrollgruppe. Bei den leichten Situationen gibt es erneut keine Gruppenunterschiede. Die Kontrollgruppe kann nach der Auswertung deutlich besser zwischen den leichten und den schwierigen Situationen unterscheiden.

Grundlegend geben die älteren Fahrer in dieser Studie keine Unterschiede zwischen den leichten und den schwierigen Situationen an. Es konnte jedoch nicht eindeutig geklärt werden, ob die gleichförmigen Antworten bei den älteren Fahrern aufgrund eines Unvermögens der Differenzierung oder aufgrund sozialer Erwünschtheit zustande kamen.

5.4 Ergebnisdiskussion

Die Fragebogenstudie wurde durchgeführt, um Aufschluss über eine mögliche Kategorisierung von Fahrern zu erhalten, welche sich in der präferierten Route unterscheiden. Das Er-

gebnis der Fragebogenstudie zeigt, dass sich die Fahrer in Bezug auf bestimmte demografische Daten, fahrdemografische Daten und Motive differenzieren lassen.

Betrachtet man die Eigenschaften der Personen aus dem Cluster 1, so kann hier am besten eine Verbindung zur *Entspannten Route* erkannt werden. Das ausgeprägte Vermeidungsverhalten spiegelt sich deutlich und nur in diesem Cluster wider.

Bei Cluster 2 wird der Wunsch nach einer abwechslungsreichen Streckenführung auch unter Einbezug von kurvenreichen Strecken deutlich geäußert. Die dem Cluster zugehörigen Fahrer sehen das Fahren nicht als Mittel zum Zweck an. Sie wünschen sich Wechsel in der Streckenführung zwischen Autobahn und Landstraße. Das resultierende Belastungspotential besitzt keinen negativen Einfluss auf sie. Aufgrund der erkennbaren Tendenz zum Ausleben könnte hier eine Empfehlung der *Aktiven Route* vorgenommen werden.

Cluster 3 lässt sich nicht eindeutig zuordnen. Auf der einen Seite wäre durch den Wunsch nach einer einfachen Streckenführung eher eine potentielle Tendenz zu der *Entspannten Route* vorhanden. Auf der anderen Seite wünschen diese Personen keine Umgehungen, welche ein Vermeidungsverhalten widerspiegeln würden. Da sie jedoch abwechslungsreiche Strecken auch nicht bevorzugen, wäre hier am ehesten die Zuordnung zu der klassischen Option der *Schnellsten Route* vorzusehen.

Die Auswertung zeigt das Potential einer individualisierten Routenplanung. Nahezu zweidrittel der befragten Personen können direkt der Gruppe zugewiesen werden, welche sich eine individuelle Anpassung der Route wünscht.

Da die Auswertung des Fragebogens zur Fahrertypisierung jedoch nur etwas über den Zustand der Person zum aktuellen Erhebungszeitpunkt aussagt, kann keine dynamische Anpassung des Nutzerprofils und damit auch keine Anpassung der automatisierten Vorauswahl hierüber erfolgen. Daher wäre eine Routengenerierung nur auf den pauschalisierten Eigenschaften des Clusters möglich, aber nicht auf individuellen Fähigkeiten und Fertigkeiten.

Der sich dynamisch verändernde, aktuelle Fahrerzustand lässt sich außerdem nur bedingt über den Einsatz des Fragebogens zur Belastungsermittlung ermitteln. An der Gruppe der Älteren Fahrer lässt sich dies deutlich aufzeigen, was die Verwendbarkeit der Methodik für die Individualisierung einer Routenplanung in Frage stellt. Qualitativ hochwertige Ergebnisse sind hier nach nicht zu erwarten, was sich bei einer Umsetzung in einer deutlich geringeren Akzeptanz widerspiegeln würde.

Um jedoch eine dynamische Anpassung des Fahrerprofils zu erhalten, müssen regelmäßig korrespondierende Indikatoren aufgenommen und ausgewertet werden. Dies sollte automatisiert erfolgen und für den Fahrer nicht zu einem unzumutbaren, zusätzlichen Aufwand führen, welchen er beispielsweise bei der Beantwortung von Fragen erfährt.

In Kapitel 6 wird daher ein Ansatz aufgezeigt, wie physiologische Maße des Fahrers in einer individualisierten Routenplanung verwendet werden können.

6 Objektivierung der Fahrer-Streckeninteraktion durch Messung psychophysiologischer Daten

Nachdem im Kapitel 5 das Nutzungspotential einer individualisierten Routenplanung für verschiedene Fahrertypen gezeigt werden konnte, widmet sich das Kapitel 6 der Identifikation relevanter physiologischer Indikatoren, korrespondierender Messmethoden, sowie der Entwicklung eines dedizierten Umsetzungsmodells.

Da die Charakteristika von Fahrern einer Dynamik unterliegen, muss das Modell imstande sein, diese entsprechend nachzubilden. Die Untersuchungen zur Nutzung von Fragebögen haben gezeigt, dass der Erhebungsaufwand diesen Anforderungen nicht gerecht werden kann. Befragungsaufwand und erreichbare Akzeptanz sind stark gegenläufig, so dass kein anwendbares Optimum gefunden wurde, welches beide Kriterien angemessen erfüllt.

Der Schlüssel für die erfolgreiche Umsetzung, der Generierung einer individuell angepassten Route an den Fahrer, liegt in der Berücksichtigung des aktuellen Fahrerzustands. Dabei spielt der Fahrer zum einen die passive Rolle eines Protagonisten, zum anderen erfolgt die Erhebung objektiv und somit nachvollziehbar und wiederholbar. Die Identifikation von physiologischen Maßen zur Beschreibung des Fahrerzustands stand zunächst im Vordergrund.

Eine grundlegende Entscheidung über die Durchführung von Studien im Realverkehr oder Simulatorstudien musste außerdem getroffen werden. Für Simulatorstudien spricht, dass belastende Infrastruktureinflüsse in sehr intensivem Maße ohne ethische Einschränkungen getestet werden können. Eine Gefährdung der Probanden ist dabei ausgeschlossen. Unter Umständen wirkt sich das Wissen der Probanden um die Risikolosigkeit des Versuchs jedoch nachteilig auf die Güte der erhobenen Fahrdaten aus. Ebenfalls ist mit Effekten aufgrund der zum Teil abstrahierten Fahrumgebung im Simulator zu rechnen.

Für Studien in realer Fahrumgebung spricht hingegen die real auftretende Belastung der Versuchspersonen, welche hier unabhängig von der Designgüte in einem Simulator ist. Nachteilig könnte sich die real auftretende Belastung auswirken, wenn sie zu einer Überbeanspruchung des Fahrers und im Extremfall zu einem Unfall führen würde.

Nach Abwägung dieser Kriterien fiel die Entscheidung für Studien im Realverkehr, um möglichst realistische Ergebnisse zu erlangen. Entsprechende Maßnahmen zur Verhinderung einer möglichen Überlastung des Fahrers wurden ergriffen.

Zunächst erfolgte die Planung einer Versuchsreihe mit dem Ziel, bestimmte Straßeninfrastrukturkombinationen in ihrem Einfluss auf die allgemeine Belastung von Fahrern zu untersuchen. Die zugrundeliegende Versuchskampagne wurde dann 2006 im Zuge einer Diplomarbeit durchgeführt (siehe Kullack, 2006). Ziel der Studie war die Identifikation potentieller Indikatoren für das Umsetzungsmodell.

Darauf aufbauend erfolgte eine In-depth-Analyse mit vier Probanden. Die Fahrleistungen der Probanden lagen zwischen eineinhalb und vier Stunden Fahrt. Diese Fahrten sollten einen tie-

feren Aufschluss darüber geben, welche Ausprägungen die Belastungen bei den Fahrern ausweisen. Hierüber wurden iterativ die faktoriellen Einflussparameter des Modells bestimmt und deren Wertigkeitsbereich festgelegt. Die Gewichtungsfunktion des Routenplaners wurde mit Hilfe der Ergebnisse angepasst, so dass der modifizierte Routenplaner realisiert werden konnte.

In 2007 und 2008 wurden dann zwölf Versuchspersonen gezielt untersucht, um auf Basis der gewonnenen Belastungsprofile individualisierte Routen zu planen. Nach erfolgreicher Umsetzung des Routenplaners erfolgte dann in 2008 eine Versuchskampagne, bei welcher die individualisierten *Entspannte Routen* in Vergleich zu einer herkömmlichen Routenplanung unter der Option *Schnellste Route* betrachtet wurden.

6.1 Untersuchung des grundlegenden Anpassungspotentials

Die erste Versuchskampagne wurde durchgeführt, um Aufschluss darüber zu erhalten, welches Potential in der Vermeidung von belastenden Situationen für den Fahrer steckt. Die Situationen bezogen sich nicht auf Fahrmanöver, da diese keine reproduzierbaren Referenzen für eine Routenplanung liefern können. Im Mittelpunkt standen Fahrsituationen, in welchen bestimmte Infrastrukturkombinationen zu durchfahren waren. Zur Bewältigung dieser Streckenabschnitte waren natürlich auch Fahrmanöver notwendig, wie z.B. ein Spurwechsel auf die relevante Abbiegerspur. Der Fokus lag aber, wie erwähnt, auf den Infrastrukturkombinationen und deren Einflüssen auf den Fahrer.

Im Zuge dieser Versuchskampagne wurden neben den physiologischen Daten auch subjektive Eindrücke der Versuchspersonen mittels Befragung erhoben. Die Ergebnisse sind in Kapitel 5.3 angeführt.

6.1.1 Versuchsdesign

Für das Design der zu durchfahrenden Teststrecke wurden als potentiell schwierig identifizierte Situationen herangezogen, wie sie unter anderem von Tränkle und Metker (1992) per Fragebogenstudie ermittelt wurden. Ebenfalls wurden Ergebnisse der Unfallstatistiken von McGwin und Brown (1999) berücksichtigt. Als Zielgruppe wurden ältere Fahrer avisiert, welche mit einer Kontrollgruppe verglichen wurden. Die Abbildung 23 zeigt den Streckenverlauf.

Die schweren Situationen wurden in Anlehnung an die bekannten Vermeidungsstrategien Älterer gewählt. Dies sollte zu erkennbaren Unterschieden zwischen den Beanspruchungen älterer Fahrer und denen der Kontrollgruppe führen. Die leichten Situationen sollten in etwa gleiches Belastungspotential für beide Gruppen bieten, so dass hier mit keinem Unterschied zu rechnen war.

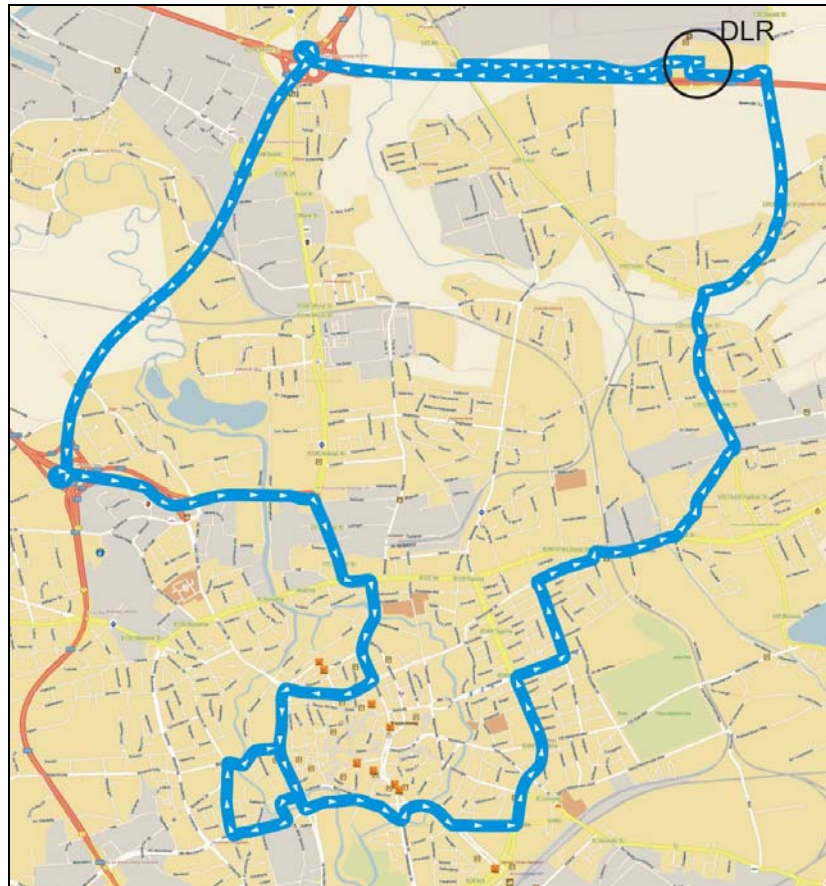


Abbildung 23: Streckenverlauf der Versuchskampagne 2005/2006 (Map24Deutschland, 2007)

Die Versuche wurden außerhalb der Hauptverkehrszeiten angesetzt, um den starken Einfluss situativer Effekte aus reiner Interaktionen mit anderen Verkehrsteilnehmern zu minimieren. Es sollten keine Versuchsfahrten unter widrigen Witterungsumständen wie Schnee, Regen oder Glatteis durchgeführt werden, um die daraus resultierenden Einflüsse ebenfalls auszuschließen.

Der Fahrtbeginn und das Ende befanden sich aus pragmatischen Gründen auf dem Gelände des DLR in Braunschweig. Die geplante Fahrtdauer belief sich auf ca. eine Stunde Fahrtzeit. Die Gruppe der älteren Fahrer wurde avisiert mit 70 Jahren \pm 3 Jahre und die der Kontrollgruppe mit 30 \pm 3 Jahre. In der Gruppe der älteren Fahrer sollten bei dieser Altersauswahl zwar schon die ersten altersbedingten Probleme beim Fahren vorhanden sein, aber noch keine wirklich risikobehafteten Situationen auftreten. Aus ethischen Gründen wurde das Alter der Versuchsfahrer daher nach oben begrenzt. Die Mitglieder der Kontrollgruppe sollten sich mit durchschnittlich 30 Jahren bereits deutlich von der hier nicht adressierten Gruppe der Fahranfänger unterscheiden.

Die zu messenden Effekte müssen deutlich der zugrundeliegenden Verkehrsinfrastruktur und nicht singulär situativen Aspekten zuzuordnen sein, damit sie in einer Routenkalkulation Berücksichtigung finden können. Die Abbildung 24 zeigt einen solchen Ausschnitt einer Fahrsituation mit spezieller Verkehrsinfrastruktur.

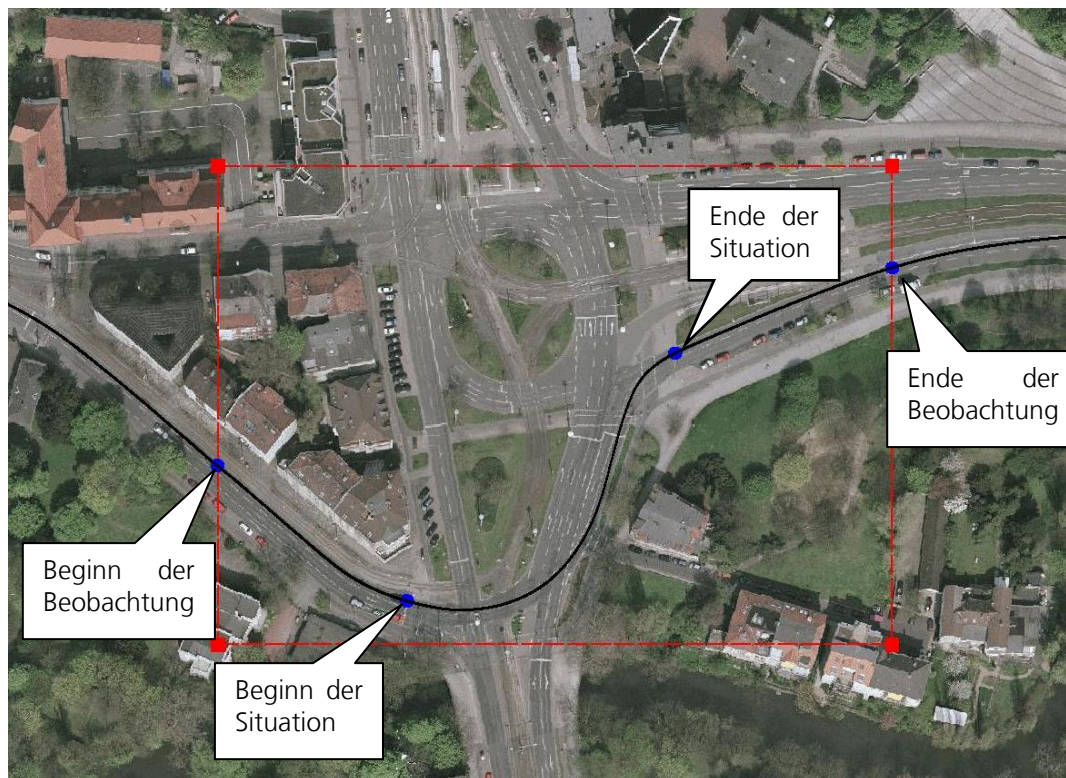


Abbildung 24: Darstellung einer Situationsdefinition (Stadt Braunschweig, 2003)

Vor und nach dem eigentlichen Untersuchungsabschnitt ist ein Beobachtungsraum angelegt, um der langsamen Veränderung der physiologischen Fahrerdaten Tribut zu zollen. Sie wurden über den Weg definiert, welcher bei der erlaubten Fahrgeschwindigkeit innerhalb von ca. fünf Sekunden durchfahren werden konnte. Dies geschah in Anlehnung an die Untersuchungen von Vollrath und Wachsmuth (2006), bei welchen nach einer optimalen Vorlaufzeit von Navigationsansagen gesucht wurde. Es wird davon ausgegangen, dass der Zeitraum äquivalent als notwendiger Vorbereitungszeitraum bei Annäherung an eine definierte Situation ist.

Eine direkte Messung der Beanspruchung kann bisher von keiner Methode geliefert werden (Schmidtke, 1993), daher wird über die regelnde Reaktion des Organismus die Beanspruchung abgeleitet. Als Kriterien wurden in der ersten Studie daher Herzrate, Interbeat-Intervall (IBI) und Hautleitfähigkeit erhoben. Unmittelbar aus dem Interbeat-Intervall ist damit auch die Varianz des Interbeat-Intervalls als Maß einsetzbar. Diese physiologischen Daten spiegeln nach Healey und Picard (2005) ausreichend den Beanspruchungszustand des Fahrers wider.

Nach Törnros und Bolling (2006) aus der Anpassung bzw. Verringerung der Fahrgeschwindigkeit auf den Belastungszustand geschlossen werden. Um mehr Zeit für akkurate Handlungen in schwierigen Situationen zu besitzen, wird mehr oder minder bewusst die Geschwindigkeit herabgesetzt. Die Geschwindigkeit wurde daher ebenfalls als Indikator aufgezeichnet und ausgewertet.

Aufgrund der Einteilung in zwei Gruppen wurde ein Querschnittsdesign gewählt, wobei zu beachten ist, dass Effekte des Alters mit denen unterschiedlicher Kohortenzugehörigkeit konfundiert sind (Wahl & Heyl, 2004).

6.1.2 Durchführung

Die Versuchspersonen wurden aus dem Probandenpool des Instituts für Verkehrssystemtechnik per Zufall gezogen. Neben dem Alter galt hier als Einschränkung lediglich der Besitz einer gültigen Fahrerlaubnis für Personenkraftwagen.

Insgesamt wurden von 16 Versuchspersonen die physiologischen Daten ausgewertet, wobei je die Hälfte der Gruppe der Älteren Fahrer und der Kontrollgruppe angehörten.

Um die Probanden an das Versuchsfahrzeug ViewCar®, einen umgebauten Audi A6 aus dem Jahr 2002 zu gewöhnen, und eine Kalibrierung einzelner Messsysteme zu ermöglichen, wurde zu Beginn der Versuchsfahrt ein gesonderter Streckenabschnitt vorgeschaltet. Eine Gewöhnung an die Beobachtung durch die nach innen gerichtete Kamera und das mit der Aufzeichnung der physiologischen Daten verbundene Tragen der entsprechenden Sensoren am Körper der Versuchsperson konnte hierbei mit vertretbarem Aufwand durchgeführt werden.

Als Versuchsfahrzeug diente der Versuchsträger ViewCar®. In Abbildung 25 sind die grundlegenden Sensoren dargestellt, welche zur Aufzeichnung des Fahrerverhaltens und der Umgebung des Fahrzeugs genutzt werden können.



Abbildung 25: Sensorik des Versuchsfahrzeugs ViewCar®

Das Fahrverhalten des Probanden kann durch die Messung des Blickverhaltens über Auswertung einer Stereokameraabbildung und die CAN-Bus-Daten aus dem Bordnetz aufgezeichnet werden. Daten des Fahrzeugumfeldes liefern der Laserscanner, die Kameras, die Spurerkennung und das Radar. Das physiologische Messsystem Health-Lab kann beispielsweise EKG, Hautleitfähigkeit, Muskelspannung und Stimmlageauswertung speichern.

Der Bezug zwischen allen detektierten und aufgezeichneten Daten wird über eine synchronisierte Aufzeichnung erlangt. Die ebenfalls aufgezeichnete Fahrzeugposition auf Basis von DGPS ermöglicht den Abgleich aller Daten auf die Verkehrsinfrastruktur. Als Zeitbasis dient dabei UTC.

Bei der ersten Versuchskampagne wurden neben den physiologischen Daten wie Herzrate, Interbeat-Intervall und Hautleitfähigkeit, alle CAN-Bus-Daten, mehrere Kameras mit Blickrichtung auf den Fahrer und auf das Fahrzeugumfeld sowie die korrespondierenden Koordinaten aufgezeichnet.

Vor Fahrtantritt wurden verschiedene demografische und fahrdemografische Informationen von den Probanden erhoben. Zu Verringerung der weiteren Störeinflüsse auf die Probanden, wurden alle Fahrten immer von derselben Versuchsleiterin begleitet, welche auf dem Beifahrersitz saß. Diese gab die Fahrtanweisungen und führte die Befragung während der Fahrt durch. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Abläufe möglichst für jeden Fahrer gleich waren.

Die physiologischen Daten wurden während der Fahrt mit dem Messsystems HealthLab aufgezeichnet. Die Aufzeichnung der Fahrzeuggeschwindigkeit erfolgte mit 20 – 32 Hz. Bei der Positionslösung erfolgte die Aufzeichnung mit 1 Hz, Kameradaten speichern mit 5 Hz.

Für die Normierung der Belastungscharakteristika der Probanden war des Weiteren eine Baselinemessung in Bezug auf das Beanspruchungsspektrum vorgesehen. Dabei kam ein sprachgesteuerter Computertest des Instituts für Luft- und Raumfahrtmedizin des DLR in Hamburg zum Einsatz. Dieser besteht aus mehreren Aufgaben mit einem ansteigenden Belastungslevel. Die physiologischen Daten der Probanden wurden dabei aufgezeichnet, um die Bandbreite und den Normalbereich der individuellen Kennwerte zu erhalten. Der Test ist so angelegt, dass jeder Proband an den Rand seiner Leistungsfähigkeit und darüber gebracht werden soll. Dies wird erreicht, indem die Aufgabenfolgezeit über die Laufzeit verkürzt wird, so dass die Aufgaben irgendwann nicht mehr gelöst werden können.

Bereits während der Durchführung der Kampagne wurde der Einsatz in Frage gestellt, da einige Probanden den Test abbrachen, weil sie nach eigenen Aussagen nicht mit der Bearbeitung zurechtkamen. Sie waren schlicht überfordert und beendeten dennoch die Bearbeitung nicht, wodurch keine Auswertung des Tests bei diesen Personen möglich war. Bei anderen Probanden wurde im Zuge der Auswertung eine wesentlich zu geringe Leistungsfähigkeit detektiert. Da die Motivation der Versuchspersonen, den Test ernsthaft zu bearbeiten, augenscheinlich zu gering war, bearbeiteten sie die Aufgaben nur mit geringer Leistung. Der Baselinetest wurde aufgrund der beschriebenen Problematik nicht in die Auswertung mit einbezogen.

Um eine Vergleichbarkeit zu erlangen, wurden die physiologischen Daten jedes Probanden über alle Situationen hinweg mittels z-Transformation standardisiert, dass heißt, pro Versuchsperson und Situation wurde ein Mittel- bzw. ein Streuungswert berechnet und die Versuchspersonenwerte damit transformiert.

Um die Situationen auch über alle Probanden vergleichbar zu halten, wurden die zu untersuchenden Bereiche vor der Auswertung festgelegt und erhielten einen entsprechenden Koordinatenraum (siehe Abbildung 24). Als Beginn einer Situation wurden dabei beispielsweise Haltelinien an Kreuzungen gewählt. Das Ende einer Situation wurde zumeist durch die erneute Interaktionsmöglichkeit mit andern Verkehrsteilnehmern festgelegt, welche nicht primär zu

der zu erfassenden Situation zählte. Dies geschah z.B. bei der Einmündung einer weiteren Fahrspur.

6.1.3 Auswertung

Zu der Gruppe der älteren Fahrer gehörten nach Ausschluss von drei Personen letztendlich acht Probanden im Alter zwischen 67 und 72 Jahren mit einem Durchschnitt von 68,8 Jahren ($SD=1,7$). Die Kontrollgruppe setzte sich ebenfalls aus acht Probanden, jedoch im Alter zwischen 27 und 31 Jahren, zusammen, welche ein Durchschnittsalter von 29,0 Jahren ($SD=1,6$) aufwiesen. Jede Gruppe bestand aus drei weiblichen und fünf männlichen Probanden. In der Fahrleistung waren die beiden Gruppen nach innen hin homogen, wobei die Gruppe der älteren Fahrer im Durchschnitt eine geringere Fahrleistung angab.

Aufgrund des Versuchsdesigns unterschieden sich die Gruppen deutlich in Bezug auf die Dauer des Führerscheinbesitzes. Während die älteren Fahrer den Führerschein in den 50er und 60er Jahren erwarben, war dies in der Kontrollgruppe erwartungsgemäß erst in den 90er Jahren möglich. Die Gruppe der älteren Fahrer besaß ihren Führerschein im Durchschnitt seit 48 Jahren ($SD = 3,64$), die Gruppe der jüngeren Fahrer im Durchschnitt erst seit 11 Jahren ($SD = 1,60$).

Eine mögliche Interaktion zwischen Alter und Schwierigkeit der Situation wurde mittels Varianzanalyse getestet. Dazu müssen die zugrunde liegenden Daten innerhalb der Gruppen aus einer Normalverteilung resultieren, die Populationsvarianzen der Gruppen mussten gleich und die Beobachtungen unabhängig sein (Landau & Everitt, 2004). Aufgrund der geringen Anzahl an Probanden konnten diese Voraussetzungen nicht zufriedenstellend getestet werden.

Nach Everitt ist die Varianzanalyse bei gleichen Zellbesetzungen aber robust gegenüber geringeren Abweichungen von der Normalverteilung und Varianzinhomogenität (Everitt, 2001). Trotzdem sind die Ergebnisse nur mit Vorsicht interpretierbar. Eine Varianzanalyse wurde daher nur bei der Analyse der Interaktion eingesetzt.

Mittels Permutationstest für Mittelwertdifferenzen wurden dann die Vergleiche der Mittelwerte durchgeführt. Dies geschah mit Hilfe eines von Rogalski (2004) geschriebenen Programms. Alle anderen Auswertungen wurden mit SPSS 14 durchgeführt.

Das Signifikanzniveau wurde mit $\alpha = 0,05$ angenommen, worauf alle weiteren statistischen Analysen basieren. Die bedingte Wahrscheinlichkeit, der p-Wert, gibt an, dass der errechnete Wert oder ein extremerer Wert erhalten wird, unter der Bedingung, dass die Nullhypothese wahr ist (Grafen & Hails, 2002).

Werden die leichten mit den schwierigen Situationen verglichen (siehe Abbildung 26), kann festgestellt werden, dass sich die z-Werte der Interbeat-Intervalle der Gruppe der älteren Fahrer und der Kontrollgruppe signifikant unterscheiden. Die Zuordnung der Situationen in leichte und schwere Situationen kann damit bestätigt werden. Hohe z-Werte geben hier eine geringe Anstrengung an. Negative Werte zeigen hier eine höhere Anstrengung gegenüber dem standardisierten Mittelwert über alle Situationen.

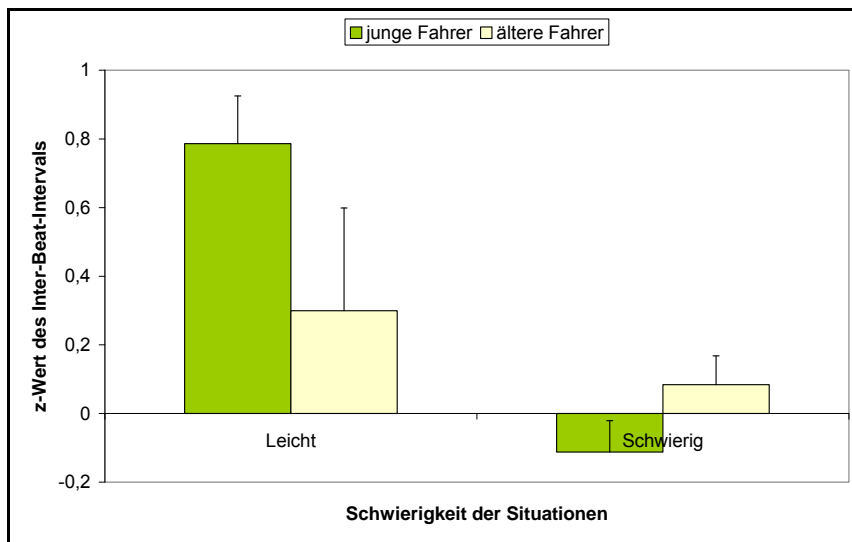


Abbildung 26: Z-Wert des IBI in leichten und schwierigen Situationen nach Kullack (2006)
(dargestellt sind die Mittelwerte und Standardmessfehler)

Beim Vergleich der als schwierig postulierten Situationen ergab sich auf Grundlage des Interbeat-Intervalls kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Gruppen. Gleiches gilt für die als leicht eingestuften Situationen

Wertet man die Variabilität des Interbeat-Intervalls entsprechend aus, so kann auch hier kein signifikanter Unterschied bei den beiden Gruppen zwischen den schwierigen und den leichten Situationen gefunden werden. Bei leichten Situationen ist eine geringere Variabilität des Interbeat-Intervalls bei den älteren Fahrern im Gegensatz zu der Kontrollgruppe erkennbar, was auf eine höhere Beanspruchung der älteren Fahrer hinweist.

Es zeigt sich nur bei der Gruppe der älteren Probanden ein signifikanter Unterschied in der Variabilität des Interbeat-Intervalls bei den leichten und den schweren Situationen. Auf dieser Grundlage scheint für die Gruppe der älteren Fahrer die Bewältigung der als schwierig postulierten Situationen tatsächlich schwieriger zu sein als die Bewältigung der leichten Situationen.

Die bereits an anderer Stelle angeführten, problematischen Situationen für ältere Fahrer, wie komplexe Kreuzungen, Rechtsabbiegen mit Fußgängern und das Befahren mehrspuriger Straßen konnten unter Verwendung der Variabilität des Interbeat-Intervalls ebenfalls bestätigt werden.

Dass sich die Ergebnisse der Auswertung des Interbeat-Intervalls und der Varianz desselben unterscheiden, zeigt, dass es sich um unterschiedliche Aspekte der Beanspruchung handelt.

Anzumerken ist an dieser Stelle, dass bei Auswertung der Variabilität des Interbeat-Intervalls nicht die leichten Situationen die größte Varianz aufwiesen. Dieses Phänomen tritt über die beiden Gruppen hinweg auf und ist nur eingeschränkt erklärbar. Vermutlich wurde bereits in Wartezeiten z.B. vor einer Ampel die Belastung so weit herabgesetzt, dass hier höhere Varianzen auftraten.

Bei der ebenfalls als Belastungsindikator angenommenen Messgröße der Fahrgeschwindigkeit zeigt sich in Abbildung 27, dass zwischen leichten und schwierigen Situationen differenziert werden kann. Ein Unterschied zwischen den beiden Gruppen konnte jedoch nicht nachgewiesen werden.

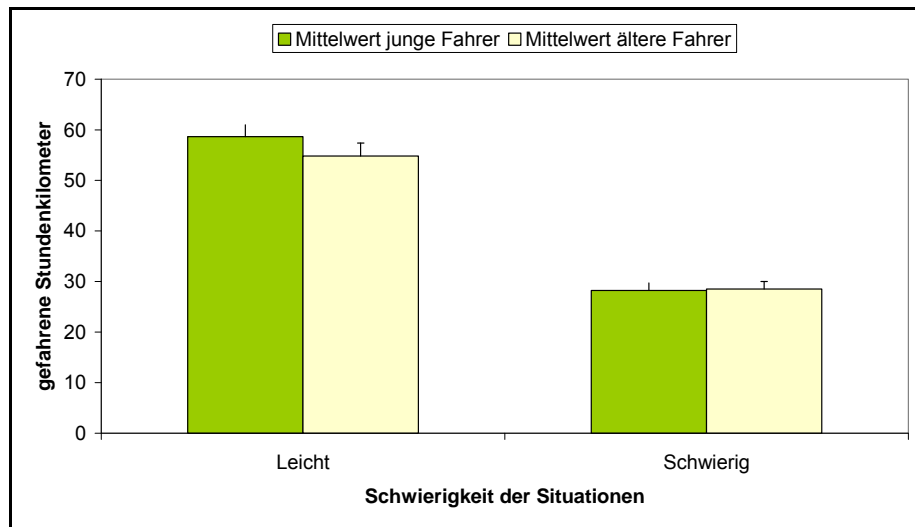


Abbildung 27: Geschwindigkeit in leichten und schwierigen Situationen nach Kullack (2006)
(dargestellt sind Mittelwerte und Standardmessfehler)

6.1.4 Ergebnisse und deren Auswirkung auf die Umsetzung

Das Ziel der ersten Versuchskampagne war es, bereits bekannte Aussagen zum Vermeidungsverhalten älterer Fahrer aus der Literatur auf deren Nutzbarkeit zur Realisierung einer individualisierten Routenplanung zu überprüfen. Ebenfalls wurden eigene Hypothesen in dieser Kampagne untersucht.

Die Auswahl älterer Fahrer als Zielgruppe wurde vorgenommen, da aus der Literatur bereits Vermeidungsstrategien bekannt waren. Eine Differenzierung des Schwierigkeitsgrades von Fahrsituationen mit Bezug auf die zugrundeliegende Infrastruktur konnte mittels physiologischer Daten gezeigt werden. Dabei erfolgte in der ersten Kampagne zunächst eine Prüfung in einer als homogen angenommenen Fahrergruppe. Im Folgenden sollen daher die Umsetzungspotentiale anhand von In-depth-Analysen einzelner Fahrer ebenfalls untersucht werden.

6.2 In-depth-Analyse des Anpassungspotentials

Zur Untersuchung der Anwendbarkeit einer individualisierten Navigationslösung wurde als nächster Schritt eine In-depth-Analyse einzelner Fahrer vorgesehen. Dabei sollte geklärt werden, wie die aus der ersten Versuchskampagne gewonnenen Erkenntnisse gezielt bei einzelnen Fahrern nutzbar sind. Des Weiteren bilden die Analysen die Grundlage für die Modellbildung und die iterative Anpassung des Modells. für die Realisierung des modifizierten Routenplaners.

6.2.1 Versuchsdesign

Um die Differenzierung der Einflussgrößen besser untersuchen zu können, musste eine entsprechend große Datenmenge je Fahrer aufgezeichnet werden. Innerhalb eines Tages sollten je Fahrer ca. zwei bis vier Stunden Fahrt realisiert werden.

Um den Fahrer nicht zu überlasten und aufgrund der begrenzten Speicherkapazität der Versuchsdaten im ViewCar® wurde alle 1,5 – 2 Stunden eine Pause von 15 – 30 Minuten zur Entspannung und Datensicherung eingeplant. Die lange Fahrtzeit wurde auch deshalb gewählt, um frei vom Eingewöhnungseffekt der Versuchsperson in Bezug auf das Fahrzeug und die Beobachtungssituation zu sein.

Es wurde wie erwähnt eine dreistufige Einteilung des Schwierigkeitsgrades vorgenommen, da ein Ziel der vorliegenden Arbeit darin besteht, eine robust anwendbare Umsetzung des entwickelten Systems zu ermöglichen. Die einfachste Stufe bezieht sich auf Streckenabschnitte, bei welchen das Ausmaß der Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern als gering eingestuft wird.

Bei der zweiten Stufe besitzt der Fahrer zwar das Vorfahrtsrecht, er muss jedoch jederzeit mit dem Fehlverhalten anderer Verkehrsteilnehmer rechnen. Eine erhöhte Aufmerksamkeit ist in jedem Fall erforderlich. Die dritte Stufe bezieht sich auf Situationen, in denen der Fahrer selber den Vorrang anderer Teilnehmer beachten muss. Die Aufmerksamkeit ist daher sehr stark gefordert. Hieraus erwächst die höchste Beanspruchung des Fahrers.

Diese Einteilung ist zum einen auf Basis physiologischer Beanspruchungsmessung entstanden, zum anderen zollt sie der bereits erwähnten technischen Umsetzbarkeit in einem robusten Algorithmus Tribut.

Für die Untersuchung der Beanspruchung auf Basis physiologischer Daten wurde eine Streckenführung im Bereich der Stadt Braunschweig geplant. Dabei mussten alle neun resultierenden Situationen mindestens einmal durchfahren werden. Die folgende Abbildung 28 zeigt die gewählten Fahrtrouten der zweiten Versuchskampagne.

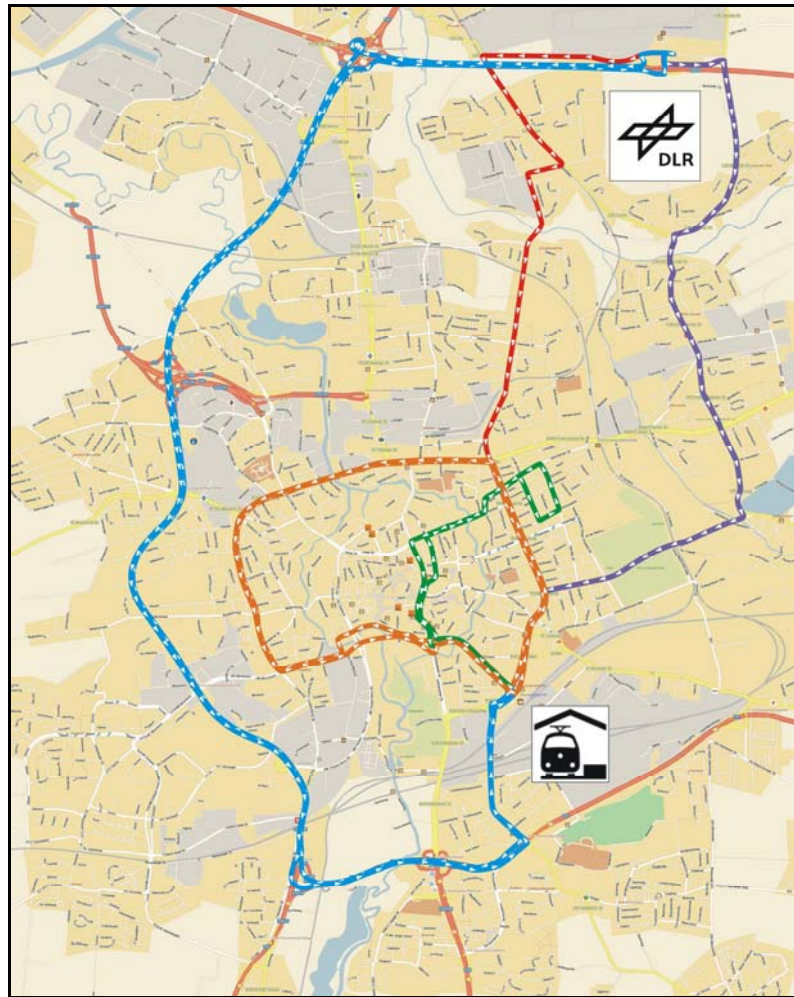


Abbildung 28: Streckenübersicht der Versuchskampagne 2006/2007 (Map24Deutschland, 2007)

Ein Großteil der Fahrten wurde zwischen dem Gelände des DLR am Forschungsflughafen Braunschweig-Wolfsburg und dem Braunschweiger Hauptbahnhof durchgeführt. Ebenfalls wurden der zweisepurige *Braunschweiger Ring* und Strecken im Gebiet *Östlicher Ring*, einem alten Wohngebiet mit sehr engen Straßen und vielen, als unübersichtlich einzustufenden Rechts-vor-Links-Kreuzungen, einbezogen. Die farbliche Unterlegung zeigt dabei die einzelnen Strecken auf. Die einzelnen Strecken wurden im Anschluss zu Fahrtblöcken kombiniert, welche eine prognostizierte Dauer von ca. 1,5 bis 2 Stunden besitzen.

6.2.2 Durchführung

Die vier Probanden wurden per Zufallsauswahl aus dem Versuchspersonenpool des Instituts für Verkehrssystemtechnik ausgewählt. Es handelt sich dabei um drei Männer und eine Frau.

Die Studie wurde mit dem Versuchsfahrzeug ViewCar® im Herbst 2006 durchgeführt. Neben der Aufzeichnung der physiologischen Daten wurden ebenfalls Informationen aus dem Fahrzeugumfeld und dem Fahrzeug gespeichert. Dabei wurden die Daten der gleichen Quellen wie bei der ersten Versuchskampagne aufgezeichnet.

Die aus den Strecken zusammengesetzten Fahrten wurden jeweils in nahezu 1,5 Stunden absolviert. Einige Streckenabschnitte wurden aufgrund der eingeplanten, aber nicht genutzten Reservezeit doppelt durchfahren.

Während der Durchführung einer Fahrt gab es Probleme mit der Datenaufzeichnung, so dass während des Versuchs zwei Umfeldkameras für die rechte und linke Voraussicht abgeschaltet werden mussten. Danach lief das System wieder stabil.

Aufgrund einer Stausituation musste außerdem eine Fahrt gegen Ende der Strecke abgebrochen werden. Dies besitzt jedoch keine Auswirkungen auf die Auswertung des Versuchs, da die Daten nur im Bereich des freien Verkehrsflusses in die Untersuchung einbezogen wurden.

6.2.3 Auswertung

Für die Analyse der Daten wurden verschiedene Methoden kombiniert, welche eine Qualitätskontrolle und Validierung der Ergebnisse ermöglichen. Zunächst wurde für die Datensichtung ein System angepasst, welches eine geografische Darstellung der physiologischen Daten ermöglicht. Dabei handelt sich um das Softwareprogramm *VerkehrslageViewer*, welches originär von einem Mitarbeiter am Institut für Verkehrssystemtechnik am DLR-Standort in Berlin entwickelt wurde (Brockfeld, 2006). Diese Software wurde ursprünglich für die Darstellung der Verkehrslage aufgebaut. Abschnittsweise ist damit die farbliche Darstellung des Verkehrszustandes möglich. Mittels softwaretechnischer Anpassung und Erweiterung konnte dieses GIS auch für die ortsgebundene Darstellung physiologischer Werte genutzt werden.

Das originäre Konzept der Darstellung und die Umsetzung wurden vom Autor der vorliegenden Arbeit entwickelt. Die Art und Weise der Umsetzung wurde gemeinsam mit dem Autor der Software geplant (Ehrenpfordt et al., 2007), die letztendliche Anpassung der Software erfolgte durch eben diesen.

Im weiteren Verlauf der Auswertungsarbeiten wurde außerdem das GIS-Programm Quantum-GIS eingesetzt. Die Abbildung 29 zeigt einen Ausschnitt aus dem sogenannten Östlichen Ringgebiet, welches sich östlich vom Braunschweiger Stadtzentrum befindet. Dort ist die Veränderung der Herzrate mittels farblicher Abstufungen dargestellt. Dabei indizieren rote Quadrate Orte einer Belastung und hellrot einer potentiellen Belastung. Die hellblauen Quadrate zeigen die Orte einer potentiellen Entlastung und die dunkelblauen einer Entlastung. Orte mit einem durchschnittlichen Wert sind farblos dargestellt.

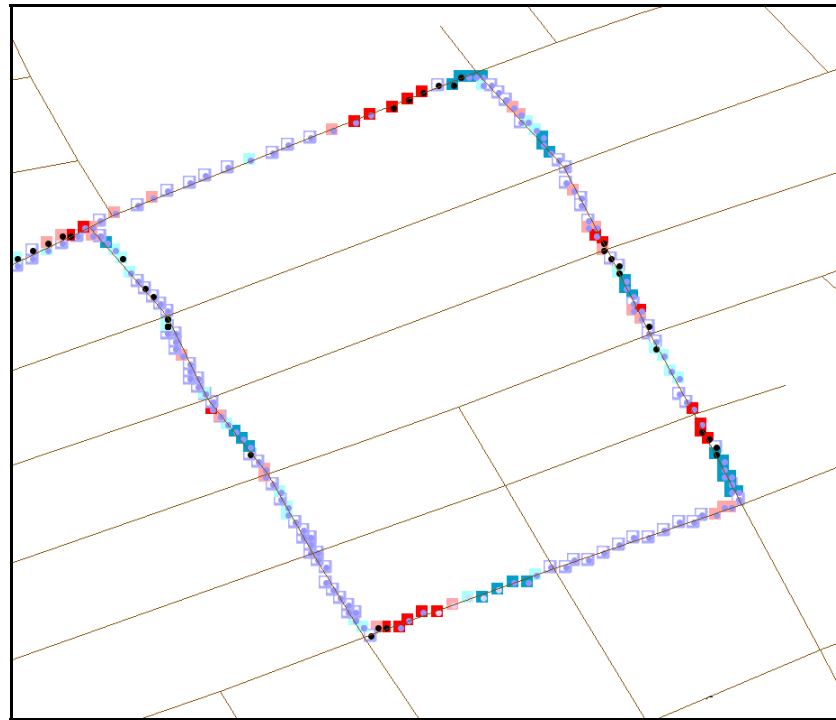


Abbildung 29: Visualisierung physiologischer Daten mittels GIS

Die Nutzung von GIS ermöglicht es, eine Übersicht über die physiologischen Daten eines Testfahrers und damit indirekt über seine Beanspruchung zur erhalten. Bei den beiden Testfahrern konnte so erkannt werden, wo eine entsprechend hohe Belastung vorgelegen hat.

Grundlegend für die Auswertung war jedoch, eine Normierung der gemessenen Werte je Versuchsperson durchzuführen, da bei jeder Person der Normalzustand über andere Werte in den physiologischen Daten definiert ist.

Für eine Nutzung der normierten, physiologischen Daten zum Zweck der Detektierung individuell belastender Infrastrukturen reicht eine Berücksichtigung des Mittelwertes und der Standardabweichung nicht aus, da lokale Maximalwerte unter Umständen nicht detektiert werden. Hierzu müssen weitere Auswertungsmethoden in Anwendung gebracht werden. Ein Vergleich mehrerer Versuchsfahrten einer Versuchsperson oder die Auswertung der Fahrten von mehreren Versuchspersonen machen eine entsprechende Normierung der Daten notwendig, weshalb ein neues Konzept der Datenauswertung entwickelt wurde.

Ein Trend in den Daten lässt sich durch Bildung der ersten Ableitung gut identifizieren. Eine Umsetzung erfolgt dabei durch die Differenzwertbildung des aktuellen mit dem Vorgängerwert. Nutzt man zusätzlich noch eine einfache Glättung der Herzrate über einen definierten Zeitraum, können alle Belastungsanstiege robust erkannt werden.

Diese Glättung sieht in der Umsetzung einen Einbezug der letzten beiden Vorgängerwerte vor. Dabei gehen die Werte mit einer absteigenden Gewichtung in die Werteberechnung ein (0,7/0,2/0,1). Diese Art der Filterung wurde aufgrund von explorativen Analysen innerhalb der vorliegenden Studie als optimal eingeschätzt, da die Dämpfung nur sehr gering ist und die Daten somit nicht verfälscht werden.

Um kurzfristige Schwankungen der Herzrate ausgleichen zu können und eine Trendentwicklung erkennbar zu machen, wird jeweils die Summe der beiden Vorgänger- und der beiden Nachfolgerwerte mit dem aktuellen Differenzwert gebildet und der aktuellen Position zugeordnet. Man erhält mit dieser Methode eine Herzratendifferenzsumme über fünf Sekunden. Liegt dieser Wert über bzw. unter den festgelegten Schwellenwerten, wird der Bereich entsprechend eingruppiert.

Bei einer reinen Nutzung von Vorgängerwerten ohne Einbezug der Nachfolgerwerte zeigte sich ein zeitlicher Versatz bei der Detektion belastender Situationen. Dieser lag dann bei der Hälfte des Gesamtbetrachtungszeitraums der Vorgängerwerte, hier also bei zwei Sekunden. Daher wurde die Berechnung eines gleitenden Mittelwertes als sinnvoller erachtet und umgesetzt.

Aufgrund weiterer explorativer Datenauswertungen wurde eine Einteilung in die folgenden fünf Bereiche gewählt:

- Belastend (Herzratendifferenzsumme ≥ 5)
- Potentiell belastend (Herzratendifferenzsumme $\geq 2,5$)
- Durchschnittlich ($-2,5 < \text{Herzratendifferenzsumme} < 2,5$)
- Potentiell entlastend (Herzratendifferenzsumme $\leq -2,5$)
- Entlastend (Herzratendifferenzsumme ≤ -5)

Hierauf aufbauend erfolgt die farbliche Darstellung im GIS, wie sie auszugsweise in Abbildung 29 zu sehen ist. Das Verfahren kann sinnvoll bei dem Vergleich unterschiedlicher Datensätze einer Versuchsperson oder bei einem Vergleich über mehrere Versuchspersonen eingesetzt werden.

Die unten stehende Abbildung 30 zeigt an einem Beispiel den Zusammenhang der Datenreihen auf. Die Schwellenwerte für die Herzratendifferenzsummen sind ebenfalls angegeben.

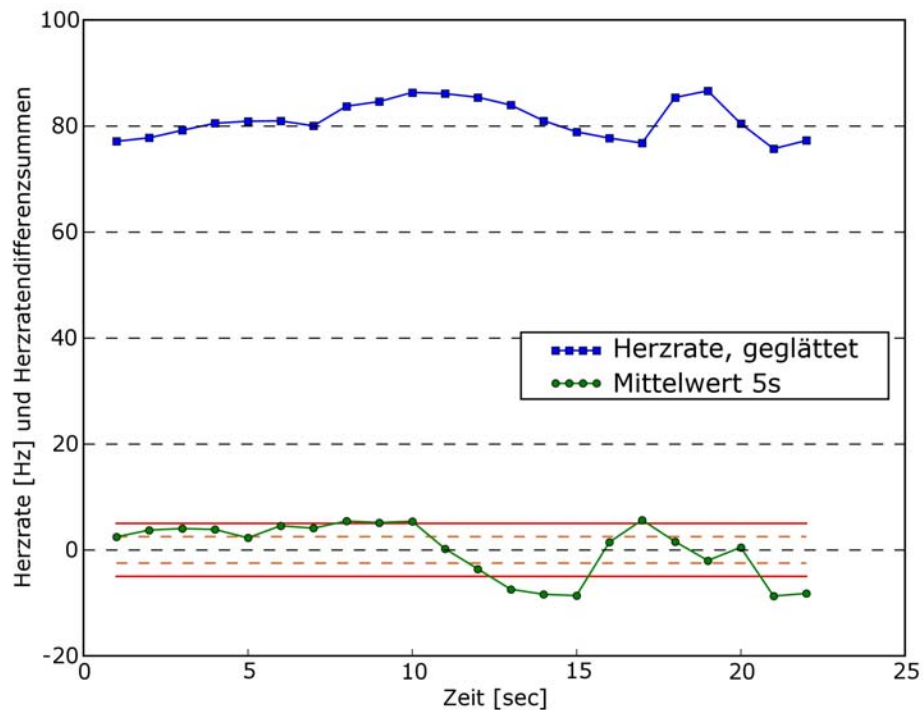


Abbildung 30: Darstellung der Auswertung der Herzrate

Die Methode der Herzratendifferenzsummen wurde zur Erkennung kurzfristiger Herzratenveränderungen entwickelt. Um länger andauernde Belastungen mit einem langsamen Anstieg des Weiteren zu erfassen, erfolgte der Einsatz einer z-Normierung. Dabei wurden Werte über der 1,5 fachen Standardabweichung als potentiell belastend und Werte unter -1,5 Standardabweichungen als potentiell entlastend eingestuft. Auch hier sollte eine Dauer von mehr als fünf Sekunden vorhanden sein, um potentielle Ausreißer oder Fehlmessungen auszuschließen.

Da die Änderung der physiologischen Werte zwar etwas über die Beanspruchung und damit indirekt auch über die Belastungssituation eines Probanden aussagt, jedoch hieraus nicht die Ursache der Änderung abgeleitet werden kann, ist im zweiten Schritt eine Sichtung der detektierten Situationen notwendig. Neben den Einflüssen aus der durchfahrenen Infrastruktur kann eine Veränderung der Belastung aus speziell situativen Vorkommnissen resultieren. Diese treten beispielsweise aufgrund einer intensiven Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern auf, welche ein entsprechendes Gefährdungspotential aufweisen und sich damit von der allgemeinen Interaktion unterscheiden, welche als Grundlage für die Einteilung der relevanten Fahrsituationen herangezogen wurde. Ebenfalls können solche situativen Vorkommnisse aufgrund der Unaufmerksamkeit des Fahrers auftreten. Sie beziehen sich im Allgemeinen auf fehlerhafte eigene oder fremde Fahrmanöver oder Einschätzungen, welche bei der Auswertung zu falschen Ergebnissen führen würden.

Eine solche Überprüfung ist durch ein von Catala Prat (2006) entwickeltes Softwareprogramm namens AroundViewCar möglich. Das Programm stellt alle im Zuge einer Versuchsfahrt mit dem ViewCar® aufgezeichneten Daten gleichzeitig dar. Eine Weiterentwicklung der Applikation zur Einbeziehung der physiologischen Daten wurde vom Autor angeregt und von Catala Prat (2006) umgesetzt. Somit ist es möglich, alle relevanten Informationen bezüglich eines

Fahrabschnittes gleichzeitig angezeigt zu bekommen. Die Abbildung 31 zeigt das Software-tool.

Am linken Rand befindet sich die Steuerung der Datenanzeige. Es können Datenquellen ausgewählt und das Abspielen in Bezug auf die Geschwindigkeit und den Blickwinkel beeinflusst werden. Im schwarz hinterlegten Bereich erfolgt die symbolisierte Darstellung des Versuchsfahrzeugs. Ebenfalls werden die Spurhaltung und umgebende Objekte angezeigt. Die Kameradaten des vorderen und hinteren Fahrzeugumfeldes sind an den passenden Positionen angeordnet. Im unteren Bereich werden neben der Kameraaufzeichnung des Probanden, Lenkwinkel, Blinkernutzung, Gas- und Bremspedalstellung, sowie Geschwindigkeit und Motordrehzahl angezeigt. Die physiologischen Daten der Herzrate oder des Interbeat-Intervalls werden mit Wert und Verlauf ebenfalls in der Software dargestellt.

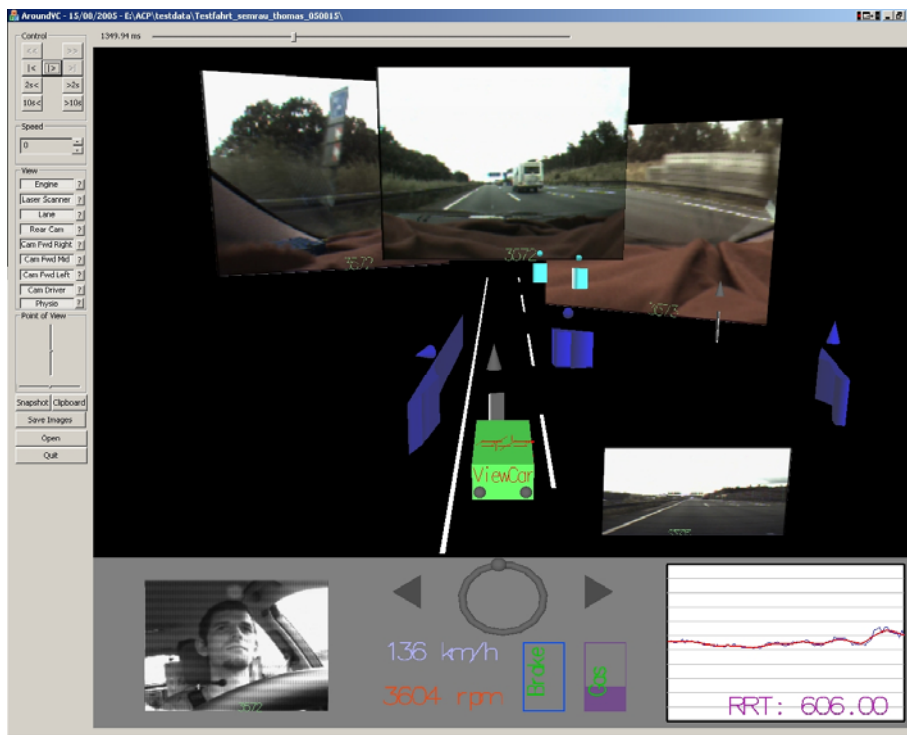


Abbildung 31: Softwareprogramm AroundViewCar (Catala Prat, 2006)

Mit diesem Softwaretool erfolgte eine Kontrolle der Streckenabschnitte, bei welchen relevante Abweichungen der physiologischen Daten aufgetreten sind. Es kann unterschieden werden, ob ortsabhängige oder ortsunabhängige Einflüsse Anlass der Veränderung der physiologischen Daten waren.

Die Zeiträume, in welchen ortsunabhängige relevante Einflüssen auftraten, werden herausgefiltert und bei der Profilbildung der Fahrer nicht weiter berücksichtigt.

Bei einer späteren Implementierung in Serienfahrzeugen ist eine solche Unterscheidung in ortsabhängige und ortsunabhängige Einflüsse mit dieser Methode schwer realisierbar. Eine automatische Situationserkennung und Situationsinterpretation im Fahrzeug könnte diesen Part übernehmen.

Ortsunabhängige Einflüsse können bei einer entsprechend großen Datenbasis mittels Datenglättung eliminieren bzw. minimieren werden. Eine kontinuierliche Erhebung des gewählten, physiologischen Datums und eine ebenfalls kontinuierliche, automatische Auswertung im Fahrzeug könnte deshalb ebenfalls eine Lösung darstellen.

6.3 Ermittlung des relevanten Indikators aus den Fahrdaten

Mit den beiden in Kapitel 6.2 beschriebenen Softwareprogrammen Verkehrslageviewer von Brockfeld (2006) und AroundViewCar von Catala Prat (2006) erfolgte die Auswertung der Versuchsfahrten. Dabei wurden alle aufgenommenen physiologischen Daten der vier Versuchspersonen zunächst mit dem GIS dargestellt.

Nach eingehender Durchsicht der Daten und auf Basis der Ergebnisse der ersten Versuchskampagne flankiert von oben angeführten Literaturquellen bestätigte sich die Annahme, dass sich die Herzrate als robustester Messwert für die weitere Umsetzung eignet. Diese Annahme wurde bereits nach Auswertung diverser Studien in Kapitel 3.3 aufgestellt und konnte nun erneut bestätigt werden.

Im folgenden Kapitel 7 wird die Umsetzung einer individualisierten Routenplanung auf Grundlage der physiologischen Daten dargestellt.

7 Umsetzung einer individualisierten Routenplanung aufgrund objektiver Beanspruchungsdaten

Aufbauend auf den vorangegangenen Studien ist eine individualisierte Routenplanung realisiert worden. Dazu wurde in Kapitel 3.1 eine Klassifizierung der Situationen vorgenommen, welche in neun unterschiedliche Kombinationen von Infrastruktur und einhergehender, potentieller Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern mündet.

Die Ausgangsbasis dazu bietet die bereits zur Darstellung der physiologischen Daten verwandte Software von Brockfeldt (2006). Neben der Darstellung von ortsbezogenen Informationen kann die originäre Software auf Basis der zugrundeliegenden Karte eine Routenberechnung durchführen. In einem weiteren Anpassungsschritt wurde die Software dahingehend erweitert, dass die Gewichtung in Abhängigkeit von der Ausprägung der physiologischen Daten erfolgen kann. Somit entstand neben der beschriebenen Darstellung von physiologischen Daten im zweiten Schritt ein Softwaretool, welches die Berechnung von Routen auf Basis eines individuellen Belastungsprofils ermöglicht. Das Grundkonzept wurde vom Autor entwickelt und die Umsetzung gemeinsam mit dem Autor der Software abgestimmt. Dieser übernahm die Anpassungsarbeiten an der Software.

7.1 Basiskonzept der neuen Routenplanung

Der grundlegende Ansatz bei der Umsetzung einer individualisierten Routenplanung liegt in der Generierung einer neuen Gewichtung für Streckenabschnitte und Knotenpunkte bzw. Kreuzungen. Die zusätzlichen Gewichtungen werden in der vorliegenden Arbeit auf Basis der potentiellen, individuellen Belastungen realisiert. Es erfolgt eine Kombination mit den üblichen Gewichtungen für eine Berechnung der *Schnellsten Route*, wobei zusätzliche Widerstände aufgebracht werden.

Die neue Gewichtung basiert zum einen auf der Streckenlänge multipliziert mit einer individuellen Belastungskomponente. Zum anderen werden zusätzliche Gewichte je nach Fahrerprofil an den entsprechenden Knoten hinzugefügt, welche die potentielle Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern widerspiegeln, wie es im Grundkonzept der neunstufigen Fahrsituationsbewertung beschrieben wurde. Als Resultat gibt es zusätzliche Reisezeiten, welche in die Routenberechnung mit einfließen.

Bei der Routenplanungsoption *Entspannte Route* erhält ein belastender Streckenabschnitt eine imaginär längere Fahrtdauer. Wird anschließend mit dem Dijkstra-Algorithmus nach der schnellsten Verbindung gesucht, wird die so umgesetzte, potentielle Belastung entsprechend berücksichtigt.

Für eine Unterscheidung der potentiellen Belastungsbereiche wird eine fünfstufige Unterteilung angewendet. Die Auslegung der Grenzwerte erfolgte grundlegend auf Basis der Auswertung der In-depth-Analyse. Dazu wurden zunächst Grenzwerte angenommen und die Ergebnisse visuell mittels GIS und faktoriell über computergestützte Datenauswertung geprüft.

Iterativ wurden dann die Grenzwerte so angepasst, dass bei den einzelnen Fahrern stabile Fahrertypen identifiziert und wiederholbar nachgewiesen werden konnten. Überprüft wurde die Grenzwertbildung mit den Versuchsfahrten der Profilerstellung der 12 Probanden aus der letzten Versuchskampagne. Dabei wurden lediglich leichte Anpassungen der Werte vorgenommen.

Die **potentiell belastenden Streckenabschnitte** erhalten einen zusätzlichen Gewichtungsfaktor von 1,2 bei der Berechnung der notwendigen Fahrdauern für diese Abschnitte. Die moderate Erhöhung resultiert aus der Erkenntnis, dass in diesen Bereichen eine erhöhte Belastung für die Person nicht eindeutig erwiesen, aber sehr wahrscheinlich ist.

Bei den **belastenden Streckenabschnitten** ist ein erhöhtes Belastungspotential deutlich erkennbar. Sie erhalten daher einen zusätzlichen Gewichtungsfaktor von 1,6 für die Berechnung der korrespondierenden Fahrtzeiten. Bei den **durchschnittlich belastenden oder unauffälligen Streckenabschnitten** erfolgt keine Anpassung der Gewichtung.

Einen geringeren zusätzlichen Gewichtungsfaktor von 0,9 erhalten die **potentiell entlastenden Streckenabschnitte**. Hierbei wurde von dem Einfluss der Infrastruktur auf den Fahrer ausgegangen, welcher nicht eindeutig erwiesen, aber wahrscheinlich ist. Die **entlastenden Streckenabschnitte** werden mit einem Gewicht von 0,7 versehen, da hier der Einfluss eindeutig feststellbar ist.

In Bezug auf die Auswertung der z-normierten Daten wurde lediglich eine dreistufige Einteilung als deskriptive Unterstützung zur Steigerung der Robustheit umgesetzt. Die so ermittelten Abschnitte fließen ebenfalls in die Berechnung mit ein, wobei es eine Unterscheidung in **potentiell belastende Streckenabschnitte** (Faktor 1,2) und **potentiell entlastende Streckenabschnitte** (Faktor 0,9) gibt. Unauffällige Streckenabschnitte werden auch hier nicht weiter angepasst.

Die angeführten Gewichtungsfaktoren werden dann auf Basis der korrespondierenden individuellen Beanspruchungsbereiche auf die entsprechenden Streckenabschnitte angewendet.

Bei den Kreuzungsbereichen, welche in den Unterkategorien 2 und 3 vorhanden sind, wird eine fiktive Wartezeit eingeführt, wenn die entsprechende Kategorie als individuell belastend eingestuft wurde. Die Kreuzungen der Kategorie A erhalten im Falle einer Belastung eine Grundverzögerung von 30 Sekunden, Kreuzungen der Kategorie B bekommen 40 Sekunden und in Kategorie C werden 60 Sekunden als Grundzusatzzeit aufgeschlagen. Die oben beschriebenen Faktoren werden je nach Ausprägung der Belastung ebenfalls auf die zusätzlichen Wartezeiten angewendet.

Die angeführten Werte spiegeln potentielle Wartezeiten wider. Sie wurden nach dem gleichen Prinzip zur Festlegung der Belastungsgrenzwerte generiert. Zunächst erfolgte die Betrachtung von Zusatzzeiten, welche aufgrund der von Begegnungsfällen in den Kreuzungsbereichen auftraten. Die Datengrundlage bildeten die Versuchskampagnen der Älteren Fahrer und der In-depth-Analyse. Auf dieser Basis wurden Grenzwerte angenommen. Eine iterative Anpassung erfolgte bei der Umsetzung des Gewichtungskonzeptes in dem Routenplaner. Dabei wurden die Grenzwerte so angepasst, dass sich nachvollziehbare Streckenadaptation

aufgrund unterschiedlicher Profilausprägungen herauskristallisierten. Eine Kontrolle der Grenzwertbildung erfolgte mit den Versuchsfahrten zur Profilgenerierung der 12 Probanden der letzten Versuchskampagne. Dabei wurden ebenfalls lediglich kleinere Anpassungen der Werte vorgenommen.

Sie sind nur für eine potentielle Belastung, nicht aber für eine potentielle Entlastung definiert, da es weder in der Literatur noch aus eigenen Auswertungen Aufschluss über das Vorhandensein entsprechend entlastender Kreuzungstypen gibt.

Die letztendliche Zuordnung der verwendeten Kategorien auf Abschnitte der zugrundeliegenden Streckennetzdaten der Firma NAVTEQ erfolgte über das in den Daten codierte Attribut *Functional Class*. Der Kategorie A wurde die Functional Class 0 zugeordnet. Unter die Kategorien B wurden die Functional Class 1, 2 und 3 subsummiert und zur Kategorie C erfolgte die Zuordnung der Functional Class 4. Die Routenberechnung erfolgt mit dem Dijkstra-Algorithmus im Softwareprogramm VerkehrslageViewer.

7.2 Testkampagne im Realverkehr

Die Umsetzung der individuellen Routengenerierung soll abschließend dargestellt werden. Hierdurch soll die Anwendbarkeit und das Potential der zugrundeliegenden Idee demonstriert werden. Zunächst mussten dazu von den Versuchspersonen Belastungsprofile aufgenommen und berechnet werden.

7.2.1 Ermittlung eines persönlichen Belastungsprofils

Die Belastungsprofile der Probanden wurden mittels Versuchsfahrten im Bereich von Braunschweig, Salzgitter und Wolfenbüttel durchgeführt, wobei wieder Streckenabschnitte aller neun Situationen abgefahren wurden.

Die Versuchsfahrten zur Ermittlung der Typisierung wurden an Werktagen außerhalb von Berufsverkehrszeiten durchgeführt, um die infrastrukturbedingten Effekte besser von den rein verkehrlichen Einflussfaktoren trennen zu können. Insgesamt wurden dabei Fahrtzeiten von ca. einer Stunde je Proband aufgenommen.

Zu den aufgezeichneten Daten gehörten die Videobilder je einer Kamera nach vorne und auf den Fahrer gerichtet, die Positionsdaten der Ortungseinheit, die CAN-Bus-Daten sowie die physiologischen Daten des Health-Lab-Systems.

Die aus den Versuchsfahrten stammenden Daten wurden zunächst aufbereitet. Dieser Prozess begann mit der Visualisierung und Aufbereitung durch die Softwareprogramme VerkehrslageViewer und Quantum-GIS. Die intrapersonalen Auswirkungen der Infrastruktur auf die Versuchspersonen wurden hierdurch ermittelt. Anschließend wurden die relevanten Streckenabschnitte einer zweiten Prüfung mit dem Softwareprogramm AroundViewCar unterzogen. Hierbei wurden alle auffälligen Bereiche, welche in ihrem Ursprung nicht infrastrukturbedingt waren, von der weiteren Auswertung ausgeschlossen. Als Ergebnis lag für jeden Probanden ein Fahrerprofil vor. Im Folgende wird zur Veranschaulichung der Ablauf der Routengenerie-

rung anhand der repräsentativen Versuchsperson VP 820 durchgeführt. In Kapitel 7.3 erfolgt anschließend die Auswertung über alle Versuchspersonen.

Die Versuchsperson VP820 zeigte nach Auswertung der Versuchsfahrt häufig in den Abschnittskategorien B2 eine potentielle Belastung, besonders wenn diese in kurvigen Bereichen zu finden waren. Messbare Belastungserhöhungen traten unter anderem im Bereich einer sechsspurig ausgebauten Straße (drei Fahrspuren je Fahrtrichtung) mit zweispuriger Straßenbahntrasse in der Straßenmitte auf (Bohlweg nahe dem Kennedy-Platz). Über die Dauer des ersten Versuchsfahrtsabschnitts wurden beispielsweise sieben Mal pro Stunde in dem Kategoriebereich B2 entsprechende Beanspruchungen detektiert.

Die Abschnittskategorien B3 und C3 waren häufig als eindeutig belastende Streckenabschnitte erkennbar. Dies zeigte sich insgesamt zwölf Mal pro Stunde an Kreuzungen vierspurig ausgebauter Straßen (zwei Fahrspuren je Fahrtrichtung) und an Kreuzungen in einem dicht besiedelten Wohngebiet (Östlicher Ring). Des Weiteren waren die aufgetretenen Beanspruchungen deutlich ausgeprägter als im Bereich B2.

Die potentielle und auch die sichere Entspannung konnte nicht mit speziellen Kategorien in Verbindung gebracht werden. Im Allgemeinen erfolgte eine Absenkung der Herzrate infolge Entspannung im Anschluss an vorangegangene, belastende Kategorien.

Das ermittelte Fahrerprofil wurde anschließend in den Routenplaner entsprechend der Gewichtungsspezifizierung eingegeben, was über eine entsprechend anzupassende Textdatei umgesetzt wurde.

7.2.2 Die Generierung der individualisierten Streckenführung

Nach Ermittlung des Fahrerprofils wurde unter Verwendung der in Kapitel 7.1 definierten Gewichtungsfaktoren die Routenberechnung gestartet. Zur Untersuchung der Wirksamkeit und des potentiellen Nutzens einer personalisierten Routenplanung wurde eine Streckenführung im Großraum Braunschweig und Wolfenbüttel gewählt. Der Startpunkt lag dabei an der Technischen Universität in Braunschweig (Rebenring/Ecke Pockelsstraße); als Ziel wurde das Lessingtheater in Wolfenbüttel (Harztorwall 18) gewählt. Die Auswahl erfolgte aufgrund der potentiellen Alternativrouten, welche eine moderate Zusammensetzung aus Stadt-, Autobahn- und Überlandabschnitten je nach Fahrerprofil ermöglichen. Ebenfalls sollte die Streckenführung in einem Bereich erfolgen, in welchem nicht die Generierung des individuellen Fahrerprofils statt fand. Die Übertragbarkeit und damit Überprüfung des Grundkonzeptes sollte somit sichergestellt werden.

Es wurden zwei Routenplanungen und, daraus resultierend, zwei Versuchsfahrten mit der Versuchsperson durchgeführt. Zunächst erfolgte die Berechnung unter der Bedingung *Schnellste Route*, welche einer normalen Routenplanung nach dem Stand der Technik entspricht. Diese Strecke wurde von der Versuchsperson durchfahren und die relevanten Daten aufgezeichnet. In Abbildung 32 ist die resultierende Streckenführung unter der Option *Schnellste Route* dargestellt.

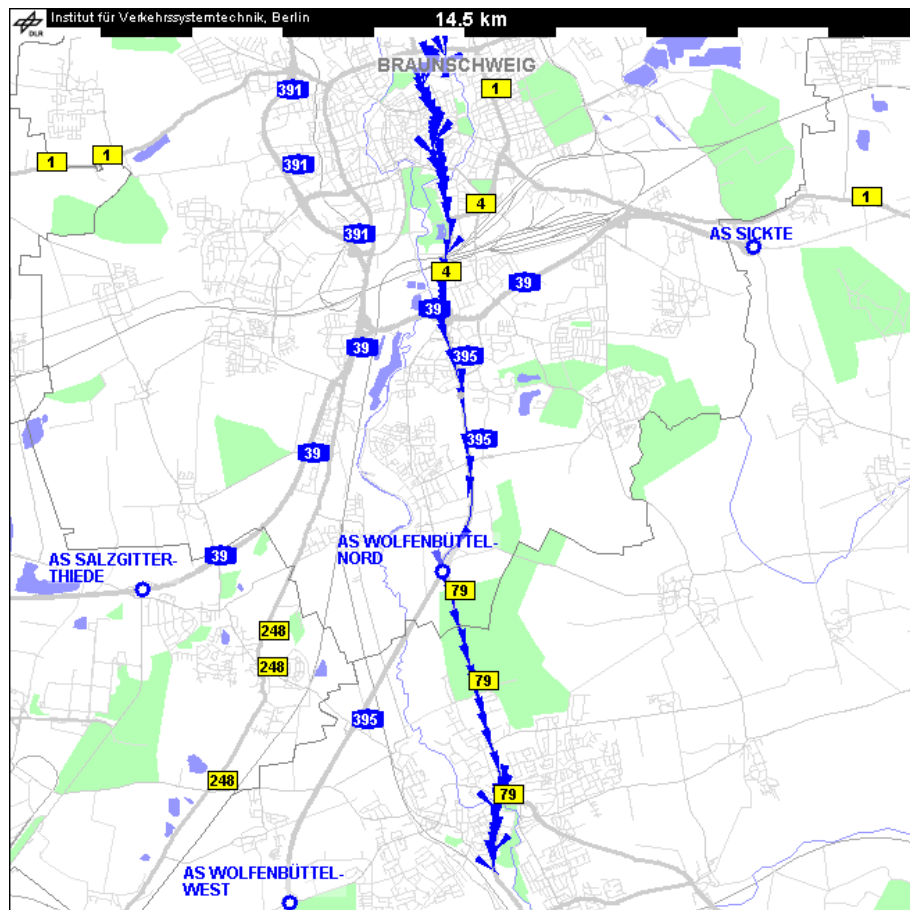


Abbildung 32: Routenplanung mit der Option *Schnellste Route*

Als zweites wurde die Umsetzung der individualisierten Routenplanung getestet. Dies geschah am Beispiel der *Entspannten Route* mit Meidung entsprechend belastender Streckenabschnitte. Hieraus sollte die geringste Belastung des Fahrers über die Gesamtstrecke resultieren. Die generierte Route ist in der Abbildung 33 dargestellt.

Hierbei ist zu erkennen, dass sich die Routenplanungen der Versuchsperson im Wesentlichen in den urbanen Bereichen differenzieren. Die Ausprägung des Fahrerprofils auf die Streckenführung ist offensichtlich.

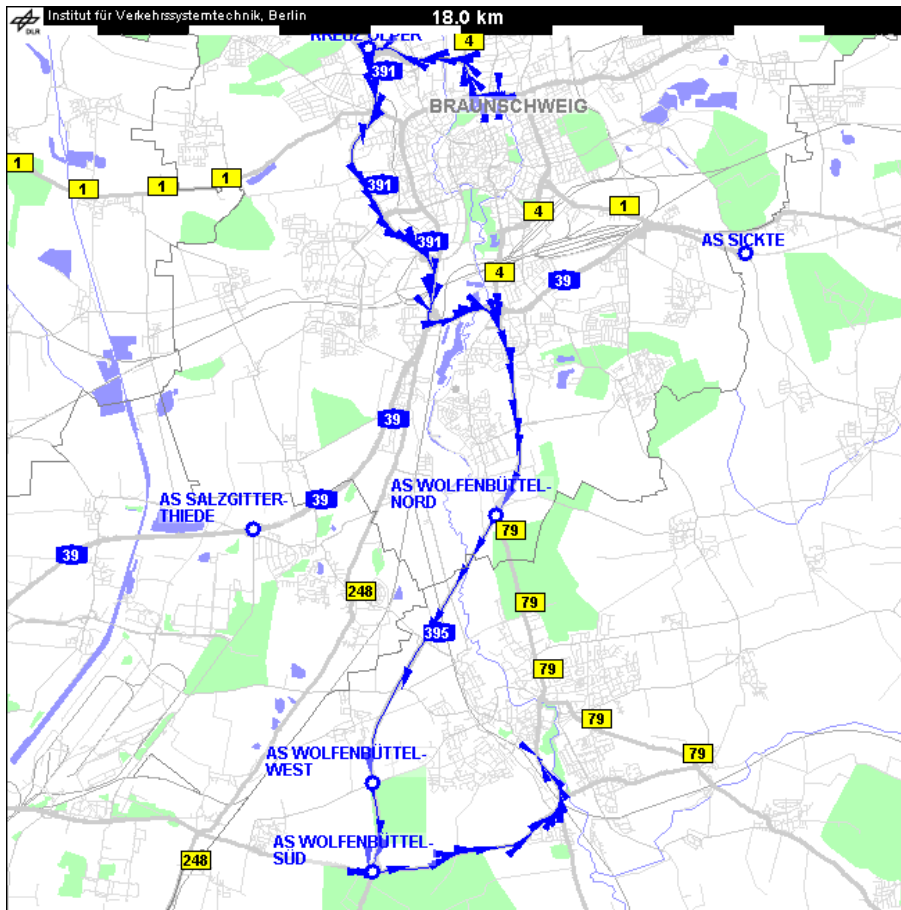


Abbildung 33: Routenplanung mit der Option *Entspannte Route*

Beide Routen sind lediglich in einem Teilbereich der Autobahn A395 zwischen dem Kreuz Braunschweig Süd und der Ausfahrt Wolfenbüttel Nord identisch. In diesem Bereich sind keine Alternativrouten vorhanden. Die individuelle Route meidet die potentiell belastenden Streckenabschnitte im innerstädtischen Bereich und kompensiert sie durch eine längere Streckenführung über Autobahnen.

7.3 Auswertungsmethodik und quantitative Verifikation

Mit einer weiteren Versuchsperson wurden im Januar 2008 die unter Kapitel 7.2.2 angeführten Routen abgefahren und die physiologischen Daten aufgezeichnet. Anschließend wurden die Belastungen über die jeweiligen Strecken ermittelt. Dies erfolgte auf Basis der Herzrate, wobei der Durchschnitt über die Gesamtfahrtzeit einer Fahrt gemittelt wurde.

Für die Versuchsperson zeigte sich bei dieser Auswertung, dass die Streckenführung unter der Option *Schnellste Route* zu einer leicht höheren Beanspruchung führte. Die durchschnittliche Herzrate lag bei 72,7 Schlägen pro Minute (SD=3,47). Die Fahrtdauer lag dabei bei 18 Minuten 19 Sekunden.

Mit der Option *Entspannte Route* war die Belastung mit einem Durchschnittswert von 70,4 Schlägen pro Minute (SD=3,35) sichtbar geringer. 23 Minuten 11 Sekunden benötigte die Versuchsperson für die Bewältigung der Strecke.

An dieser Versuchsperson wird das Potential der Belastungsminimierung aufgrund einer individualisierten Streckenführung bereits erkennbar. Qualitativ zeigt sich dabei, dass individuell belastende Streckenabschnitte gemieden werden können, was sich in einem allgemein geringeren Belastungsniveau der Versuchsperson widerspiegelt.

Eine quantitative Verifikation auf Basis einer größeren Probandenzahl zeigt die Auswertung der Studie aus 2008. Hierbei wurde ein gekreuztes Design bei der Reihenfolge der Routen gewählt, um möglichen Einflüssen, wie die der Fahrdauer des Probanden vor Beginn der jeweiligen Untersuchungsfahrt, entgegen zu wirken.

Die quantitative Überprüfung erfolgte an einer Gruppe von 12 Probanden, von welchen die Fahrerprofile wie in Kapitel 7.2.1 beschrieben, erstellt wurden. Darauf aufbauend erfolgte die Berechnung der individuellen Streckenführung. Dies führte zu generell fünf unterschiedlichen Strecken zwischen dem Startpunkt und dem Zielort bei der Verwendung der persönlichen Fahrerprofile und der Option *Entspannte Route*. Diese Streckenführungen sind in Anhang D angeführt. Eine der Varianten entspricht der *Schnellsten Route*, womit es vier Strecken unter der Option *Entspannte Route* gibt.

Bei drei der Versuchspersonen (VP123, VP196 und VP736) führte das persönliche Fahrerprofil zu keiner Abweichung zwischen der *Schnellsten Route* und der *Entspannten Route*. Somit konnte kein Vergleich zwischen den Streckenführungen durchgeführt werden, weshalb die Probanden in der weiteren Untersuchung nicht weiter berücksichtigt werden konnten. Alle drei weisen eine durchschnittliche bis überdurchschnittliche, jährliche Fahrleistung auf und besitzen zwischen neun und 30 Jahren eine Fahrerlaubnis. Dies lässt den Rückschluss zu, dass Ihre Fahrerfahrung sehr ausgeprägt und ihre aktuelle Fahrpraxis sehr gut ist. Im Umkehrschluss ist die Wahrscheinlichkeit sehr hoch, dass alle drei nur geringe Defizite bei der Fahrzeugführung aufweisen und somit nur ein minimales Potential für die Generierung einer *Entspannten Route* vorhanden ist. Bedingt ist dies auch an den generierten Fahrprofilen der drei Probanden erkennbar. In Kombination mit den einschränkenden Randbedingungen der Start und Zielwahl war hier kein Potential zu einer weiteren Entspannung vorhanden.

Die neun verbleibenden absolvierten die Streckenführung unter der Option *Schnellste Route* und der jeweils individuellen *Entspannten Route*.

Es schloss sich der Vergleich der physiologischen Daten auf der klassischen Streckenführung und der neuen Variante an. Als physiologisches Maß wurden jeweils die mittleren Herzraten der beiden Routen einer Versuchsperson verglichen, korrespondierend zum in Kapitel 7.2.2. beschriebenen Ablauf.

Aufgrund fehlerbehafteter Daten mussten zwei weitere Personen (VP194 und VP808) von der Auswertung ausgeschlossen werden. Die aufgezeichneten, physiologischen Daten wiesen eine starke Oszillation der Messwerte auf, was auf einen fehlerhaften Sensor oder eine fehlerhafte Aufzeichnung während der Durchführung der Versuchsfahrt zurückzuführen ist. Eine Gesamtübersicht der Einzelergebnisse ist dem Anhang E zu entnehmen.

Die für die Auswertung zugrunde gelegte Versuchspersonengruppe setzte sich letzten Endes aus drei Frauen und vier Männern zusammen. Das mittlere Alter betrug 33,9 Jahre (SD=4,86).

Die jährliche Fahrleistung ließ sich als sehr heterogen bezeichnen, was sich in einem Durchschnittswert von ca. 20.000 Kilometern ($SD=13.000$ Km) wider spiegelte.

Im Vergleich der beiden Optionen, der *Schnellsten Route* und der *Entspannten Route*, trat bei der Versuchspersonengruppe eine durchschnittliche Differenz der Belastung von 2,94 Schlägen pro Minute ($SD=1,02$) auf.

Mittels t-Test wurde überprüft, ob sich die Herzrate in der Option *Entspannte Route* und der *Schnellsten Route* signifikant unterscheiden. Mit einem Signifikanzniveau von $p=0.01$ konnte die Nullhypothese, dass die Erwartungswerte der *Schnellsten Route* und der *Entspannten Route* gleich sind, abgelehnt werden. Demnach gibt es eine signifikante Verringerung der Herzrate welches den Schluss einer insgesamt entspannteren Routenführung zu lässt.

Die durchschnittlichen Fahrt dauern lassen sich in Bezug auf die *Entspannte Route* aufgrund der vier unterschiedlichen Streckenführungen nicht vergleichen. Die vier individuell entspannten Streckenführungen besitzen stark differierende Streckenlängen und fahrbare Geschwindigkeitsprofile. Während die *Schnellste Route* von allen Versuchspersonen in ca. 21 Minuten absolviert wurde, variieren die Zeiten für die individuell *Entspannte Route* zwischen 22 Minuten und maximal 30 Minuten.

7.4 Diskussion der Ergebnisse

Die Auswertung der Versuchsfahrten zeigt, dass die grundlegende Idee einer personalisierten Routenplanung ein entsprechendes Potential an Entlastung von Fahrern bietet. Lediglich einem Viertel der Versuchspersonen konnte bei der Routenplanung mit der *Entspannten Route* keine von der *Schnellsten Route* abweichende Streckenführung geboten werden. Dies kann auf das zugrundeliegende Fahrerprofil, die Routingaufgabe oder auf dem Zusammenspiel beider Faktoren zurückgeführt werden.

Es zeigt sich in Analogie zu den Ergebnissen der Fahrertypisierung aus 5.2.2, dass einem bestimmten Personenkreis keine individualisierte Streckenführung zugeordnet werden kann. Auf der einen Seite ist dies bedingt durch die Fahrpräferenzen, auf der anderen Seite bieten individuelle Fähigkeiten und Fertigkeiten zu wenig Potential für die Generierung einer *Entspannten Route*.

Im Zuge der Datenauswertung fiel besonders auf, dass eine direkte Entlastung von Fahrern aufgrund einer bestimmten Infrastrukturkombination nicht beobachtet werden konnte. Vielmehr erfolgte eine potentielle Entlastung immer nach einer vorangegangenen Belastungsphase. Dies lässt eher den Schluss zu, dass es sich hierbei um die natürliche Regeneration bzw. Wiederherstellung des ursprünglichen Grundbelastungsniveaus handelt. Zu vermuten ist, dass die Fahrer eine reale Entlastung aufgrund der durchfahrenen Infrastruktur nur erfahren, wenn diese über einen längeren Zeitraum konstant ist. Methodisch wäre dies nur über die Auswertung der Abweichung von der 1,5-fachen Standardabweichung möglich, welche die langfristigen Veränderungen aufzeigt. Faktisch würden sich aber dann auch der Mittelwert und dessen Standardabweichung in Richtung der Entlastung verschieben. Das Herzrattendifferenzsummenverfahren eignet sich aufgrund seiner Konzeption nicht für eine solche Auswertung.

Da die Versuchsfahrten zur Ermittlung des Fahrerprofils originär darauf ausgelegt waren, eine möglichst hohe Anzahl an Situationen der neunstufigen Skala zu realisieren, umfassten die Fahrten keine langen, gleichförmigen Streckenabschnitte. Es wäre dabei wieder die Unterforderung der Fahrer aufgrund einer monotonen Fahrtstrecke zu beachten und ggf. zu vermeiden. Das Potential einer direkten Entlastung bleibt damit weiter schwer erschließbar. Die Belastungsoptimierung kann bislang lediglich über die Vermeidung potentiell belastender Situationen erfolgen.

Problematisch in der exakten Umsetzung zeigte sich auch die Einbindung der knotengebundenen Zusatzgewichte. Deren Auslegung beeinflusst maßgeblich die Ausprägung der individuellen Route. Weitere Versuchsfahrten zu einer profunderen Abschätzung der hier angemessenen Werte sind zukünftig sinnvoll.

Ebenfalls hat sich gezeigt, dass das ursprüngliche Konzept der neunstufigen Fahrsituationsbewertung für den Bereich der Unterkategoriegruppen A3, B3 und C3 jeweils nach Abbiegevorgang in Linksabbiegen und Rechtsabbiegen differenziert werden sollte. Somit kann eine verbesserte Anpassung ermöglicht werden, was sich in der Qualität der Belastungsoptimierung widerspiegeln wird. Bei der Kategorie A3 sollte diese Unterteilung analog nach Auffahren oder Abfahren erfolgen.

Die Auswertung zeigt jedoch deutlich das Potential einer individualisierten Routenplanung. Es ist ein signifikanter Unterschied der Herzrate zwischen beiden Routenplanungsoptionen nachweisbar. Die vergleichsweise niedrigen Standardabweichungen sprechen für eine hohe Homogenität der aufgezeichneten Messwerte.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit zeigt auf, dass eine individualisierte Streckenführung zu einer Verringerung der Belastung führen kann. Zur Realisierung wurde das aus der Infrastruktur resultierende, persönliche Belastungspotential erhoben und verwendet. Die zugrunde liegenden Versuchsfahrten wurden mit dem Versuchsfahrzeug ViewCar® des DLR durchgeführt. Aus den Untersuchungen ergab sich, dass sich als geeignetes physiologisches Maß die Herzrate anbietet, da sie die notwendige Robustheit in der Messung und Abbildung mit sich bringt.

Durch den Einsatz von GIS-Software wurden die physiologischen Daten aufbereitet, über eine Visualisierungssoftware von Fehlern bereinigt und anschließend zu individuellen Fahrerprofilen zusammengefasst. Die Fahrerprofile beeinflussten innerhalb der Routenplanung die Gewichtungsfaktoren von Streckenabschnitten und Knotenpunkten.

Bei einer anschließenden Untersuchung erfolgte die Routenberechnung unter Berücksichtigung der persönlichen Belastungsprofile. Verglichen wurde dabei eine herkömmliche Streckenführung unter der Option *Schnellste Route* mit einer Streckenführung unter der neuen Option *Entspannte Route*. Die Ergebnisse zeigen, dass bei den untersuchten Versuchspersonen die individuelle Streckenführung mit der *Entspannten Route* einen signifikant niedrigeren Belastungszustand ergab. Dieser wurde über den Durchschnittswert der Herzrate über die Gesamtstrecke operationalisiert.

Zukünftig müssen weitere quantitative Beurteilungen durchgeführt werden, um die Erstellung des individuellen Profils weiter zu optimieren. Außerdem muss die zweite Option, die *Aktive Route*, umgesetzt und untersucht werden. Es ist anzunehmen, dass sie ein großes Potential in der zukünftigen Ausbildung von Fahranfängern bieten kann. Ebenfalls können Personen von einer solchen Routenplanung profitieren, welche nach längerer Zeit die Wiederaufnahme des Fahrens beabsichtigen. Insgesamt ließe sich über diese Routenplanungsoption der Aufbau von Fahrerfahrung mit einem deutlich reduzierten Risikopotential ermöglichen.

Des Weiteren sollte ein besonderer Fokus auf die Optimierung der Gewichtungsfaktoren gelegt werden. Sie besitzen, wie bereits erwähnt, den größten Einfluss auf die Gestaltung der individuellen Routen und müssen daher besonders sorgfältig bemessen und angewendet werden.

Ebenfalls ist eine Differenzierung der Abbiegevorgänge in Kreuzungen weiter zu untersuchen, wovon im Besonderen die Qualität des Verfahrens profitieren kann.

Da zurzeit keine physiologischen Daten in Serienfahrzeugen erhoben werden, muss eine Messung dieser als Voraussetzung für eine individualisierte Routenplanung etabliert werden. Dies könnte z.B. über am Lenkrad angebrachte Sensoren erfolgen.

Die in der vorliegenden Arbeit aufgebaute Methodik ist in der Lage, allgemein belastende Infrastrukturkombinationen im Straßennetz zu identifizieren. Hierbei müssen Versuchsfahrten mit einer repräsentativen Gruppe von Fahrern durchgeführt werden. Die Auswertung der Daten über alle Fahrer kann zum einen Infrastrukturmerkmale aufzeigen, bei welchen entspre-

chende Trassierungsrichtlinien, z.B. die Richtlinie für die Anlage von Straßen (RAS), nicht oder nur unzureichend berücksichtigt wurden. In einem weiteren Schritt kann so mittels gesicherter, statistischer Auswertungen eine generelle Überprüfung und Anpassung der Trassierungsrichtlinien in Bezug auf eine räumliche Linienführung erfolgen (Ehrenpfordt et al., 2007, Ehrenpfordt et al. 2008).

Die erarbeiteten Methoden bieten somit den Schlüssel zur Erschließung des Potentials der Beinaheunfälle. Sie besitzen einen deutlichen Vorteil gegenüber der klassischen Auswertung von Verkehrsunfällen wie sie z.B. Wiltchko (2001) mittels GIS durchführte. Da Beinaheunfälle nicht erfassungspflichtig sind, fehlte bislang die notwendige Datengrundlage, welche nun über eine Auswertung der infrastrukturbedingten Belastungen aufgebaut werden kann.

Abschließend lässt sich anmerken, dass eine individualisierte Routenplanung zukünftig eine besondere Rolle bei der weiteren Verbesserung der Sicherheit im Straßenverkehr spielen kann. Die neuartige Idee des Einbezugs der Navigationsebene bietet ein entsprechend großes Potential.

Abkürzungsverzeichnis

ACC	Adaptive Cruise Control
ADAS	Advanced Driver Assistance Systems
ARI	Autofahrer-Rundfunk-Information
BFU	Schweizerische Beratungsstelle für Unfallverhütung
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
BOC	Binary Offset Carrier Modulation
BVWP	Bundesverkehrswegeplan
CAN	Controller Area Network
CDMA	Code Division Multiple Access
DGPS	Differential GPS
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
DRIVE	Dedicated Road Infrastructure for Vehicle Safety in Europe
EBU	Europäische Rundfunkunion
EDA	Elektrodermale Aktivität
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
EKG	Elektrokardiogramm
EMG	Elektromyographie
ENG	Elektronystagmografie
EOG	Elektrookulogramm
ESC	Electronic Stability Control
FAS	Fahrerassistenzsystem

FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V.
GDF	Geographic Data Format
GIS	Geo-Informationen-System
GLONASS	Globalnaya Navigatsioannaya Sputnikova Sistema
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
GST	Galileo Standard Time
HMI	Human-Maschine-Interface
IBI	Interbeat-Interval
IP	Integrated Project
ISA	Intelligent Speed Advisory
ISO	International Standardization Organisation
ITS	Intelligent Transportation Systems
LBS	Location Based Service
LDW	Lane Departure Warning
M	Mittelwert
P-Code	Precise Code
POI	Point of Interest
PRN	Pseudo Random Noise
RAS	Richtlinie für die Anlage von Straßen
RDS	Radio Data System
SAPOS	Satelliten-Positionierungssystem
SD	Standardabweichung
SRA	Swedish National Road Administration

SOK	Selektive Optimierung mit Kompensation
SPSS	Statistical Product and Service Solutions
TA	Timing Advance
TDMA	Time Division Multiple Access
TPEG	Transport Protocol Experts Group
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
USA	United States of America
UTC	Universal Time Coordinated
VEBIS	Verfahren zur vergleichenden Erfassung der kognitiven Beanspruchung im Straßenverkehr
WAAS	Wide Area Augmentation System
WGS84	World Geodetic System 1984
WLAN	Wireless Local Area Network

Literaturverzeichnis

- Abendroth, B. (2001). Gestaltungspotentiale für ein PKW-Abstandsregelsystem unter Berücksichtigung verschiedener Fahrertypen. Stuttgart, Ergonomia Verlag.
- Adelt, P. J., Grimmer, W., Stephan, R. E. (1997). Autofahrertypen auf Deutschlands Straßen. Bremerhaven, Wirtschaftsverlag NW.
- AKTIV-Büro (2007). AKTIV - Adaptive und Kooperative Technologien für den Intelligenten Verkehr.
- Allenbach, R. H., Hubacher, M., Huber, C. A., Siegrist, S. (1993). Verkehrstechnische und -psychologische Sicherheitsanalyse von Straßenabschnitten. Bern, Schweizerische Beratungsstelle für Unfallverhütung.
- Assmann, E. (1985). Untersuchung über den Einfluss einer Bremsweganzeige auf das Fahrverhalten. München, Technische Universität München.
- Backhaus, K., Erichson, B., Plinke, W., Weiber, R. (2000). Multivariate Analysemethoden. Berlin, Springer.
- Baldock, M. R. J., Mathias, J. L., McLean, A. J., Berndt, A. (2006). Self-regulations of driving and its relationship to driving ability among older adults. Accident Analysis and Prevention 30: 313 - 322.
- Ball, K., Owsley, C., Stalvey, B., Roenker, D. L., Graves, M. (1998). Driving avoidance, functional impairment, and crash risk in older drivers. Accident Analysis and Prevention 30: 313 - 322.
- Baltes, P. B., Baltes, M. M. (1989). Optimierung durch Selektion und Kompensation. Zeitschrift für Pädagogik 35: 85-105.
- Bauer, M. (2003). Vermessung und Ortung mit Satelliten. Heidelberg, Herbert Wichmann Verlag.
- Benda, H., Hoyos, C., Schaible-Rapp, A. (1983). Klassifikation und Gefährlichkeit von Straßenverkehrssituationen. Bergisch Gladbach, Bundesanstalt für Straßenwesen.
- Berlin-Institut für Bevölkerung und Entwicklung (2006). Bevölkerung in Deutschland 1950 - 2050.
- Berger, H. J., Bliersbach, G., Dellen, R. G. (1975). Fahrformen und Erlebnisentwicklung bei der Teilnahme am Straßenverkehr. Köln, Universität Köln.
- Bernotat, R. (1970). Anthropotechnik in der Fahrzeugführung. Ergonomics 13: 353-377.

- BMBF (2004). Traffic Online - Online Verkehrsdatenerfassung aus Mobilfunknetzen. Köln, Bundesministerium für Bildung und Forschung, Förderkennzeichen 19 B 4035 E.
- BMVBS (2007). Verkehr in Zahlen 2006/2007. Bonn/Berlin, Bundesminister für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.
- BMVBW (2004). Verkehr in Zahlen 2004/2005. Bonn/Berlin, Bundesminister für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen.
- BMW (2003). Verkehrsmanagement 2010. <http://www.vm2010.de/web/>.
- Bokranz, R., Landau, K. (1991). Einführung in die Arbeitswissenschaften: Analyse und Gestaltung von Arbeitssystemen. Stuttgart, Ulmer.
- Boucsein, W. (1995). Die elektrodermale Aktivität als Emotionsindikator. Biopsychologie von Stress und emotionalen Reaktionen. Hrsg.: G. Debus, G. Erdmann & K. W. Kallus. Göttingen, Hogrefe: 143 - 162.
- Boucsein, W. (1999). Electrodermal activity as an indicator of emotional processes. Korean Journal of the Science of Emotion & Sensibility 2: 1 - 25.
- Braun, J. (1980). Adaptive Ermittlung kürzester Routen in Verkehrswegenetzen. Bad Honnef, Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung und Verkehrswesen der Technischen Universität München.
- Brockfeld, E. (2006). VerkehrslageViewer. Berlin.
- Brookhuis, K. A., De Waard, D. (2001). Assessment of Drivers' Workload: Performance and Subjective and Physiological Indexes. Stress, Workload and Fatigue. P. A. Hancock, P. A. Desmond. New Jersey, Lawrence Erlbaum Associates: 321-333.
- Brosius, G. (1989). SPSS/PC+ Advanced Statistics and Tables. Hamburg, McGraw-Hill.
- Brouwer, W. H., Rothengatter, J. A., Van Wolffelaar, P. (1991a). Older Drivers Handling Road Traffic Informatics: Divided Attention in a Dynamic Driving Simulator. VTlrapport.
- Bubb, H. (2003). Fahrerassistenzen - primär ein Beitrag zum Komfort oder für die Sicherheit? Der Fahrer im 21. Jahrhundert, Braunschweig, VDI Verlag.
- Bukasa, B., Wenniger, U. (1985). Beziehung zwischen verkehrspsychologischen Testverfahren und Kriterien des Fahrverhaltens unter Verwendung einer Fahrertypologie. Zeitschrift für Verkehrssicherheit 31: 80-85.
- Bundesamt für Straßenwesen (2005). Straßenverkehrsunfälle. Wiesbaden.
- Carlson, N. R. (2004). Physiologische Psychologie. München, Pearson, 8. Auflage.
- Catala Prat, A. (2006). AroundViewCar. Braunschweig.
- Cohen, A. S. (1996). Psychisch bedingte Straßenbreite. Köln, Verlag TÜV Rheinland.

- Collet, C., Petit, C., Champley, S., Dittmar, A. (2003). Assessing workload through physiological measurements in bus drivers using an automated system during docking. *Human Factors* 45(5): 539-548.
- Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R., Stein, C. (2004). *Algorithmen - Eine Einführung*, Oldenbourg Verlag.
- De Waard, D. (1996). *The measurement of drivers mental workload*. Groningen, The Traffic Research Centre VSC.
- De Waard, D., Brookhuis, K. A. (1991). *Assessing driver status: A demonstration experiment on the road*. Groningen, Pergamon Press plc.
- Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*. 1: 269–271.
- Donges, E. (1999). *A Conceptual Framework for Active Safety in Road Traffic*. Vehicle System Dynamics.
- Donges, E., Naab, K. (1996). Regelsysteme zur Fahrzeugführung und Stabilisierung in der Automobiltechnik. *at - Automatisierungstechnik*. 5: 226-236.
- Eberspächer, J., Vögel, H. J., Bettstetter, C. (2000). *GSM Global System for Mobile Communication*. Stuttgart, Teubner.
- EBU (2007). *B/TPEG - Transport Protocol Experts Group*, EBU.
- Ehrenpfordt, I., Brockfeldt, E., Kullack, A., Eggert, F. (2007). Entwicklung eines grafischen Analysewerkzeugs zur Darstellung und Auswertung physiologischer Fahrdaten. *Der Fahrer im 21. Jahrhundert*, Braunschweig.
- Ehrenpfordt, I., Eggert, F. (2007). *The Personalized Scout - From Vision to Implementation*. ITS in Europe, Aalborg.
- Ehrenpfordt, I., Kullack, A. (2006). Verringerung der Beanspruchung älterer Autofahrer durch individuelle Navigation. 22. VDI/VW-Gemeinschaftstagung Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenz, Wolfsburg, VDI-Verlag.
- Ehrenpfordt, I., Rataj, J. (2005a). Individualization of dynamic route planning in navigation systems. *Automation, Assistance and Embedded Real Time Platforms for Transportation*. Braunschweig, GZVB.
- Ehrenpfordt, I., Rataj, J. (2005b). Driver Customized Navigation. *The 5th European Congress and Exhibition on Intelligent Transportation Systems and Services HITS*, Hannover, ER-TICO.
- Ehrenpfordt, I., Rataj, J. (2005c). Fahrmotive und Fahrsituationen als Basis einer Fahrertypisierung zur individuellen Routengenerierung. *Komfort als Entwicklungskriterium in der Systemgestaltung*. Grandt/Bauch. Bonn, DGLR e.V. DGLR- Bericht 2005-05: 55-61.

- Ehrenpfordt, I., Rataj, J. (2006a). Verfahren und Vorrichtung zur automatisierten individuellen Navigation eines Kraftfahrzeugs. Deutsche Patentanmeldung DE 10 2004 056 686.
- Ehrenpfordt, I., Rataj, J. (2006b). Advanced Navigation Systems - Using Environment-based Workload to Individualize Route Planning. 13th World Congress and Exhibition on Intelligent Transportation Systems and Services, London, ERTICO.
- Ehrenpfordt, I., Rataj, J., Noyer, U., Kullack, A., Hübner, K., Eggert, F. (2008). Identification of critical road infrastructure by analysing physiological data obtained from multiple test driver. ITS in Europe, 7th European Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services, Genf, ERTICO, 04.06. – 06.06.2008.
- Eisenlauer, S. (2006). Integration von Navigation in Fahrerassistenzsysteme. Augsburg.
- Eisenmenger, M., Pötsch, O., Sommer, B. (2006). Bevölkerung Deutschlands bis 2050 - 11. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung. Wiesbaden, Statistisches Bundesamt.
- ERTICO (2007). MAPS&ADAS.
- Europäische Kommission (2001). Die europäische Verkehrspolitik bis 2010: Weichenstellung für die Zukunft. Luxemburg, Amt für amtliche Veröffentlichungen der Europäischen Gemeinschaft.
- Everitt, B. S. (2001). Statistics for Psychologists. Mahwah, Erlbaum.
- Fastenmeier, W. (1995). Autofahrer und Verkehrssituationen. Köln, Verlag TÜV Rheinland GmbH.
- Fastenmeier, W., Gstalter, H. (2006). Anforderungsgerechtes Autofahren: Wie zuverlässig sind jüngere und ältere Fahrer? Mensch Verkehr Umwelt, Institut für Angewandte Psychologie.
- FGSV (1988). RAS-N - Richtlinie für die Anlage von Straßen - Netzgestaltung. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Köln.
- Fischer, T., Rößger, L. (2000). Forschungsorientierte Vertiefung zum Thema: Theorie und Indikatoren psychophysiologischer Aktivierung bei Fahraufgaben. Lehrstuhl für Verkehrspsychologie. Dresden, TU Dresden.
- Freiesleben, H-C. (1978). Geschichte der Navigation. Wiesbaden, Franz Steiner Verlag GmbH. 2. Auflage.
- Fuller, R. (1984). A Conceptualization of Driving Behaviour as Threat Avoidance. Ergonomics 27: 1139-1155.
- Gelau, C. (1999). Informations- und Assistenzsysteme im Auto benutzergerecht gestalten. Bergisch Gladbach, Bundesanstalt für Straßenwesen.

- Grafen, A., Hails, R. (2002). Modern statistics for the life sciences. Oxford, Oxford University Press.
- Gregersen, N. P., Berg, H.-Y., Engström, I., Nolen, S., Nyberg, A., Rimmö, P.-A. (1999). Sixteen years age limit for learner drivers in Sweden – an evaluation of safety effects. *Pergamon, Accident Analysis and Prevention* 32, 25 – 35.
- Greibinger, G. (2003). Juristische Aspekte der Verkehrsteilnahme älterer Menschen. *Zeitschrift für Gerontopsychologie & -psychiatrie* 16: 141 - 148.
- Grimmer, W., Adelt, P. J., Stephan, R. E. (1995). Die Akzeptanz von Navigations- und Verkehrsführungssystemen der Zukunft. Bonn, Deutscher Psychologenverlag.
- Gritzmann, P. Brandenberg, R. (2002). Das Geheimnis des kürzesten Weges: Ein mathematisches Abenteuer. Berlin, Springer.
- Haas, I., Pfafferott, I., Schulze, H. (1991). Verkehrsteilnehmer und Verkehrsteilnehmerinnen im vereinten Deutschland. Unfall- und Sicherheitsforschung Straßenverkehr. Bremerhaven, Wirtschaftsverlag NW. 85.
- Haider, W., Rohmert, W. (1976). Untersuchung zur Lidschlussfrequenz bei vierstündiger simulierter Kraftfahrzeugfahrt. *European Journal of Applied Psychology* 39: 137-148.
- Haller, W. (2006). Das neue Merkblatt für die Anlage von Kreisverkehren. Karlsruhe.
- Hart, P. E., Nilsson, N. J., Raphael, B. (1968). A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*: 100-107.
- Hasse, C. (2005). Identifikation von Fahrertypen mit dem Ziel der Entwicklung eines individuellen Navigationssystems. Institut für Psychologie. Braunschweig, Technische Universität Braunschweig.
- Healey, J., Picard, R. (2005). Detecting Stress During Real-World Driving Tasks. *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*.
- Heine, G. (2001). GSM-Signalisierung verstehen und praktisch anwenden. Poing, Franzis Verlag GmbH.
- Heise Online (2007). Rechtsstreit um den Namen "Galileo". <http://www.heise.de/08.01.2007>.
- Helander, M. (1978). Applicability of drivers electrodermal response to the design of the traffic environment. *Journal of Applied Psychology* 63: 481-488.
- Heller, O. (1982). Theorie und Praxis des Verfahrens der Kategorienbildung. Forschungsbericht 1981. O. Heller. Würzburg.

- Hennessy, D. E. (1995). Vision testing of renewal applicants: Crashes predicted when compensation for impairment is inadequate. Research and Development Section. Sacramento, California Department of Motor Vehicles.
- Hering, K. (1999). Verkehrspsychologische Beanspruchungsforschung. Situationsabhängiges Verfahren zur standardisierten Messung der kognitiven Beanspruchung im Straßenverkehr. Literaturübersicht und empirische Felduntersuchung. Hering. Köln, Unveröffentlichte Dissertation.
- Hertel, P. (1990). Das Geheimnis der alten Seefahrer – Aus der Geschichte der Navigation. Hermann Haack Verlagsgesellschaft mbH. Gotha.
- Hinz, W. (2007). Autofahrer-Rundfunk-Informationen, Wikipedia.
- Hipp, E. (2006). AKTIV Adaptive und Kooperative Technologien für den Intelligenten Verkehr. Kirchheim unter Teck, AKTIV-Büro.
- Horberry, T., Anderson, J., Regan, M. A., Triggs, T. J., Brown J. (2006). Driver distraction: The effects of concurrent in-vehicle tasks, road environment complexity and age on driving performance. *Accident Analysis & Prevention* 38: 185-191.
- Hoyos, C., Kastner, M. (1986). Belastung und Beanspruchung von Kraftfahrern. Bergisch Gladbach, Bundesanstalt für Straßenwesen.
- ISO (2004). Intelligent transport systems - Geographic Data Files (GDF) - Overall data specification - ISO 14825.
- Kais, M., Dauvillier, S., De La Fortelle, A., Masaki, I., Laugier, C. (2004). Towards Outdoor Localization Using GIS, Vision System and Stochastic Error Propagation. Palmerstone North, 2nd International Conference on Autonomous Robots and Agents.
- Kaiser, F. G., Schreiber, E., Fuhrer, U. (1994). Mobilität und emotionale Bedeutung des Autos. Ein Extremgruppenvergleich zwischen Viel- und Wenigfahrern. *Mobilitätsverhalten*. Flade. Weinheim, Psychologie Verlags Union: 113 - 130.
- Kantowitz, B. H., Simsek, O. (2001). Secondary-task measures of driver workload. Stress, workload and fatigue. P. A. Hancock, Desmond, P. A. New Jersey, Lawrence Erlbaum Associates: 395 - 408.
- Kersken, U. (2005). Neue Entwicklungen der Verkehrstelematik und der elektronischen Fahrerunterstützung. VDI Verlag GmbH.
- Klebensberg, D. (1982). Verkehrspsychologie. Berlin, Springer-Verlag.
- Klingspohr, H., Block, T., Grigat, R.-R. (1997). Ein echtzeitfähiges System zur Erkennung der Blickrichtung des menschlichen Auges. *Mustererkennung 1997*. F. M. Wahl. Braunschweig, Springer.

- König, W., Weiß, K.-E., Mayser, C. (2002). S.A.N.T.O.S - Situations-Angepasste und Nutzer-Typ-zentrierte Optimierung von Systemen zur Fahrerunterstützung. München.
- Kühnel, S., Anders, M., Bergner, J. (2002). Routenplaneranalyse - Verwendete Algorithmen und deren Komplexität. Görlitz/Zittau, Hochschule Görlitz/Zittau: 31.
- Kullack, A. (2006). Beanspruchung älterer Autofahrer im Straßenverkehr. Institut für Psychologie. Braunschweig, Technische Universität Braunschweig.
- Küster, U., Reiter, K. (1987). Technikwissen und Fahrverhalten junger Fahrer. Bergisch Gladbach, Bundesanstalt für Straßenwesen.
- Landau, S., Everitt, B. S. (2004). A handbook of statistical analysis using SPSS. Boca Raton, Chapman & Hall/CRC.
- Langford, J., Koppel, S. (2006). Epidemiology of older driver crashes - Identifying older driver risk factors and exposure patterns. Transportation Research Part F.
- Lau, O. (2006). Wegweiser der Zukunft. c't 7: 176 - 179.
- Lazarus, R. S. (1966). Psychological Stress and the Coping Process. New York, Mc Graw-Hill.
- Lazarus, R. S., Launier, R. (1978). Stress related transactions between persons and environment. Perspectives in international psychology. L. A. L. Pervin, M. New York, Plenum Press: 287 - 327.
- Lazarus, R. S., Launier, R. (1981). Stressbezogene Transaktionen zwischen Personen und Umwelt. Stress: Theorien, Untersuchungen, Maßnahmen. J. R. Nitsch. Bern, Huber: 213 - 259.
- Lemmer, K. (2003). Von Assistenzsystemen im Verkehr zu Assistenzsystemen für den Menschen. Antrittsvorlesung, TU-Braunschweig, 09.04.2003.
- Lemmer, K. (2004). Das kommunikative Auto - Entwicklungen und Trends in der Telematik und bei Fahrerassistenzsystemen. Prag, AutoUni Summer School.
- Lemmer, K. (2005). Mensch-Maschine-Interaktion. Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. Hans-Hermann Braess & Ulrich Seiffert, GWV Fachverlage GmbH: 656 - 661.
- Lemmer, K., Kullack, A., Rataj, J., Ehrenpfordt, I. (2006). Individualisierte Routenplanung am Beispiel älterer Fahrer. CeBIT in Motion - Forum für Telematik und Navigation. Hannover.
- Leutner, D., Brünken, R. (2002). Lehr-Lernpsychologische Grundlagen des Erwerbs von Fahr- und Verkehrskompetenz. Bergisch Gladbach, Bundesanstalt für Straßenwesen.
- Luczak, H. (1987). Psychophysiologische Methoden zur Erfassung psychophysiologischer Beanspruchungszustände. Arbeitspsychologie. U. Kleinbeck und J. Rutenfranz. Göttingen, Hogrefe.

- Mann, U.-H., Ratzenberger, R., Schubert, M., Kollberg, B., Gressner, K., Konanz, W., Schneider, W., Platz, H., Kotzagiorgis, S., Tabor, P. (2001). Verkehrsprognose 2015 für die Verkehrswegeplanung.
- Mansfeld, W. (2004). Satellitenortung und Navigation. Wiesbaden, Vieweg Verlag. 2. Auflage.
- Manzey, D. (1998). Psychophysiologie mentaler Beanspruchung. Ergebnisse und Anwendungen der Psychophysiologie. F. Rösler. Göttingen, Hogrefe: 799 - 864.
- Map24Deutschland (2007). Braunschweig in der Übersicht. <http://www.de.map24.com/>.
- Marstaller, R. (2002). S.A.N.T.O.S. München, Technische Universität München.
- Mayhew, D. R., Simson, H. M. (1995). The Role of Driving Experience: Implications of the Training and Licensing of New Drivers. Traffic Injury Research Foundation.
- McGwin, G., Brown, D. B. (1999). Characteristics of traffic crashes among young, middle-aged and older drivers. Accident Analysis and Prevention 31: 181 - 198.
- Mummendey, H. D. (1999). Die Fragebogen-Methode. Grundlagen und Anwendung in Persönlichkeits-, Einstellungs- und Selbstkonzeptforschung. Göttingen, Hogrefe.
- Murchland, J. D. (1971). Shortest Distances Between all Vertices in a Network, and Allied Problems. Veröffentlichungen des Instituts für Stadtbauwesen. C. S. Heidemann, K. Braunschweig, Technische Universität Braunschweig: 1 - 24.
- Navteq (2007). Navteq. 2007. <http://www.navteq.com/>.
- Nickel, P., Eilers, K., Seehase, L., Nachreiner, F. (2002). Zur Reliabilität, Validität, Sensitivität und Diagnostizität von Herzfrequenzvariabilität als Indikatoren psychischer Beanspruchung.
- Nitsch, J. R. (1981). Stress. Bern, Verlag Hans Huber.
- Onmeda (2006). Interpretation des EKG, Onmeda.
- Ortgiese, M. (2007). Mobile Navigation - Always on? Graz, ptv.
- Otto, H.-U., Flament, M., Landwehr, M. (2006). FEEDMAP- Incremental Updating Meets Map-Based Probes. 13th ITS World Conference, London, ERTICO.
- Owsley, C., Stalvey, B., Wells, J., Sloan, M. E. (1999). Older drivers and cataract: Driving habits and crash risks. Journal of Gerontology 54(4): 203 - 211.
- Pang, C., Chu, M.-H. (2007). Personalised Route Selection system in Vehicle Navigation based on Neural-Fuzzy Technologies. 14th World Congress and Exhibition on Intelligent Transportation Systems and Services, Peking, ERTICO.

- Pape, U. (1971). Kürzeste Wege in Netzwerken zwischen festen Knoten. Veröffentlichungen des Instituts für Stadtbauwesen. C. S. Heidemann, K. Braunschweig, Technische Universität Braunschweig: 25 - 53.
- Park, K., Bell, M. G. H., Kaparias, I., Belzner, H. (2007). Developement of a software tool to learn user preferences for personalised route guidance. 14th World Congress and Exhibition on Intelligent Transportation Systems and Services, Peking, ERTICO.
- Petrov, I., Schierbaum, T. (2005). TPEG - Verkehrsfunk ohne Grenzen? München, Institut für Rundfunktechnik GmbH: 28 - 29.
- Pfendler, C. (1990). Zur Messung der mentalen Beanspruchung mit dem NASA-Task Load Index. Zeitschrift für Arbeitswissenschaften 44: 158 - 163.
- Piechulla, W. (2007). Erfahrung.
- Planek, T. W., Condon, W. E., Fowler, R. C. (1968). An investigation of the problems and opinions of aged drivers. Chicago, National Safety Council.
- Platt, F. N. (1970). Heart rate measurements of drivers with the Highway Systems Research car. Journal of Medical Association of Georgia 59(1): 16-22.
- Pohlmann, S. (1994). Navigationssysteme: Potentiale und Probleme für ältere Autofahrerinnen und Autofahrer. Autofahren im Alter. U. Tränkle. Köln, Bonn, TÜV Rheinland, Deutscher Psychologen Verlag. 30: 281-306.
- Projektgruppe Begleitendes Fahren (2003). Begleitetes Fahren ab 17 - Vorschlag zu einem fahrpraxisbezogenen Maßnahmenansatz zur Verringerung des Unfallrisikos junger Fahrerinnen und Fahrer in Deutschland. Bergisch Gladbach, Bundesanstalt für Straßenwesen.
- Quenault, S. W., Fuhrmann, J. (1969). Fahrverhaltensbeobachtung und Fahrerklassifikation im Straßenverkehr. Zeitschrift für Verkehrssicherheit 15: 245-261.
- Rasmussen, C. K., Knapp, T.J., Garner, L. (2000). Driving-induced stress in urban college students. Percept. Mot. skills 90(2): 437-443.
- Rasmussen, J. (1983). Skills, Rules and Knowledge. IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics SMC-13: 257-266.
- Rasmussen, J. (1986). Information Processing and Human-Machine Interaction.
- Rataj, J., Ehrenpfordt, I. (2007). Wenn Autos wissen, wo sie sind - Fahrerassistenz mit Ortsbezug. Satellitennavigation und Verkehrsanwendungen - Chancen innovativer Technologien, Köln.
- Rataj, J., Vollrath, M. (2006). What is difficult at intersections? Virtual and real driving. ITS World Congress, London, ERTICO.

- Reichenbach, E. (1979). Wegewahl als kognitiver Prozess. Karlsruhe, Institut für Städtebau und Landesplanung der Universität Karlsruhe (TH).
- Reschnar, G., Schlag, B. (2002). Bewältigungsstrategien älterer Autofahrer. Mobilität und gesellschaftliche Partizipation im Alter. B. Schlag & K. Megel, Stuttgart, Kohlhammer: 242-257.
- Ribbeck, K. F. (1971). Routensuche in Stadtstraßennetzen. Veröffentlichungen des Instituts für Stadtbauwesen. C. Heidemann & K. Stöcker. Braunschweig, Technische Universität Braunschweig: 55 - 71.
- Richter, P., Weise, G., Heger, R., Wagner, T. (1996). Fahrverhalten und psychophysiologische Aktivierung von Kraftfahrern als Bewertungskriterium der Gestaltungsgüte von Straßenverkehrsanlagen. Dresden, Technische Universität Dresden.
- Richter, P., Weise, T., Heger, R., Weise, G. (1998). Psychophysiological analysis of mental load during driving on rural roads - a quasi-experimental field study. *Ergonomics* 41(5): 593-609.
- Riedel, A., Arbinger, R. (1997). Subjektive und Objektive Beurteilung des Fahrverhaltens von PKW-Fahrern. Frankfurt am Main, Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT).
- Rimmö, P.-A., Hakamies-Blomqvist, L. (2002). Older drivers' aberrant driving behaviour, impaired activity and health as reason for self-imposed driving limitation. *Transportation Research Part F*: 47 - 62.
- Rogalski, K. (2004). Permutationstest. Kiel.
- Rohmert, W., Laurig, W., Philipp, U., Luczak, H. (1973). Heart Rate Variability and Work-Load Measurement. *Ergonomics* 16(1): 33 - 44.
- Sauter, M. (2006). Grundkurs Mobile Kommunikationssysteme. Vieweg, 2. Auflage.
- Schandry, R. (1998). Lehrbuch der Psychologie. Weinheim, Beltz, 4. Auflage.
- Scherer, T. (2000). Stimme, Emotion und Psyche. Untersuchung zur emotionalen Qualität der Stimme. Fachbereich Psychologie. Marburg, Philipps-Universität Marburg.
- Schießl, C., Vollrath, M., Altmüller, T., Dambier, M., Kornblum C. (2006). What is strenuous? Driving itself or the driving situation? 13th World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services, London.
- Schmid, W. (2001). Berechnung kürzester Wege in Straßennetzen mit Wegeverboten. München, Deutsche geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften.
- Schmidt, R. F., Lang, F., Thews, G. (2004). Physiologie des Menschen. Berlin Heidelberg New York, Springer-Verlag.

- Schmidtke, H. (1993). Mentale Beanspruchung durch informatorische Belastung. *Ergonomie*. H. Schmidtke. München, Hanser: 142 - 160.
- Schmidtke, H., Bubb, H. (1993). Das Belastung-Beanspruchungskonzept. *Ergonomie*. H. Schmidtke. München, Hanser: 116 - 120.
- Schmitz, B. B. (1994) Mobilitätsmotive: Warum ist der Mensch mobil? In A. Flade: Mobilitätsverhalten. Psychologie Verlags Union. Weinheim.
- Schultz, M. C., Schultz, J. T. (2003). The Effects of Age on Stress Levels and Its Affect on Overall Performance, American Association of Behavioral and Social Sciences.
- Schulze, H. (1998). Lebensstil und Verkehrsverhalten junger Fahrer und Fahrerinnen. Bergisch Gladbach, Bundesanstalt für Straßenwesen.
- SRA (2006). Vision Zero - from concept to action. Borlänge, Swedish National Road Administration.
- Stadt Braunschweig (2003). Amtliche Stadtkarte. Fachbereich Stadtplanung und Umweltschutz, Abteilung Geoinformation.
- Statistisches Bundesamt (2006). Unfallgeschehen im Straßenverkehr 2005. Wiesbaden
- Teleatlas (2007). The Navigation Destination, Teleatlas. <http://www.teleatlas.com/index.htm>.
- Törnros, J., Bolling, A. (2006). Mobile phone use - effects of conversation on mental workload and driving speed in rural and urban environments. *Transportation Research Part F(9)*: 298 - 306.
- Tränkle, U., Metker, T. (1992). Über die Schwierigkeiten, die jüngere und ältere Fahrerinnen und Fahrer bei verschiedenen Fahr- und Manövrieraufgaben erleben. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit* 38 (2): 54-63.
- Tsuji, H., Nozawa, N. (2007). Estimation Method of Physiological Travelling Load for a Wheelchair Navigation System. 14th World Congress and Exhibition on Intelligent Transportation Systems and Services, Peking, ERTICO.
- UNO (2007). Bevölkerungsentwicklung der Erde. 2007.
- Valsan, A. (2007). Trends, Technology Roadmaps and Strategic Market Analysis of Vehicle Safety Systems in Europe. Vehicle Safety Summit Europe 2007, London.
- Vance, D. E., Roenker, D. L., Cissell, G. M., Edwards, J. D., Wadley, V. G., Ball, K. K. (2006). Predictors of driving exposure and avoidance in a field study of older drivers from the state Maryland. *Accident Analysis and Prevention* 38: 823 - 831.
- Vivoli, G., Bergomi, M., Rovesti, S., Carrozzi, G., Vezzosi, A. (1993). Biochemical and haemodynamic indicators of stress in truck drivers. *Ergonomics* 36(9): 1089-1097.

- Vollrath, M., Schießl, C.; Altmüller, T., Dambier, M., Kornblum, C. (2005). Erkennung von Fahrmanövern als Indikator für die Belastung des Fahrers. Fahrer im 21. Jahrhundert. VDI, VDI-Verlag GmbH. 1919: 103 - 112.
- Vollrath, M., Wachsmuth, E. (2006). In 500 Metern rechts abbiegen! Wann stören Navigationsinformationen den Fahrer? Deutsche Gesellschaft für Psychologie, Nürnberg.
- Vorndran, I. (2006). 18 - bis 24-Jährige im Straßenverkehr: Die 7 risikoreichsten Jahre. Wiesbaden, Statistisches Bundesamt.
- Wagner, T. (1999). Eine bedienungs- und personenbezogene Analyse von Fahraufgaben - am Beispiel von Landstraßenabschnitten. Empirische Verkehrspsychologie. Lengerich, Bernhard Schlag: 42 - 65.
- Wagner, T., Rudolf, M., Noack, F. (1998). Die Herzfrequenzvariabilität in der arbeitspsychologischen Feldforschung - Methodenprobleme und Anwendungsbeispiele. Zeitschrift für Arbeits- und Organisationspsychologie. 4: 197-204.
- Wahl, H.-W., Heyl, V. (2004). Gerontology - Einführung und Geschichte. Stuttgart, Kohlhammer.
- Wevers, K., Hendriks, T. (2007). AGORA-C Map-Based Location Referencing. Transportation Research Record 1972 / 2006: 115 - 122.
- Wickens, C. D. (1996). Engineering Psychology and human performance. New York, Harper Collins Inc.
- Wilson, G. F. (2001). An Analysis of Mental Workload in Pilots during Flight using multiple psychophysiological Measures. The International Journal of Aviation Psychology 12(1): 3-18.
- Wiltshko, T. (2001). Einsatz eines Geo-Informationssystems zur Analyse des Unfallgeschehens im Ballungsraum. Bonn, Kirschbaum, Straßenverkehrstechnik 6/2001: 277 – 286.
- Winner, H. (1996). Adaptive Cruise Control System Aspects and Development Trends. Overview and Update of ITS System Developments. Society of Automotive Engineers. Warrendale.
- Wörmann, M. (2000). Auswirkung verbaler Kommunikation auf das Blickverhalten beim Autofahren. Institut für Psychologie. Würzburg, Bayerische Julius-Maximilians-Universität.
- Yerkes, R. M., Dodson, J. D. (1908). The Relation of Strength of Stimulus to Rapidity of Habit-Formation. Journal of Comparative Neurology and Psychology 18: 459 - 482.
- Ziegert, T. (2000). Nutzung von Verhaltensmustern zur Lokalisierung mobiler Objekte. Düsseldorf, VDI Verlag GmbH, Fortschritt-BerichteVDI Reihe 10 Nr. 651.
- ZDNet (2007). TechReport: Wireless Security, ZDNet.de.

9 Anhang

Anhang A - Pseudocode Dijkstra

//Initialisierung

01 für jedes v aus V

02 $\text{Distanz}(v) := \text{unendlich}$, $\text{Vorgänger}(v) := \text{kein}$

03 $\text{Distanz}(s) := 0$, $\text{Vorgänger}(s) := s$, $U := V$

//Algorithmus

04

05 solange U nicht leer

06 wähle u aus U mit $\text{Distanz}(u)$ minimal

07 $U := U - \{u\}$

08 wenn $u = z$ dann STOP # optional

09 für jedes (u,v) aus E mit v aus U

10 wenn $\text{Distanz}(u) + \text{Kosten}(u,v) < \text{Distanz}(v)$ dann

11 $\text{Distanz}(v) := \text{Distanz}(u) + \text{Kosten}(u,v)$

12 $\text{Vorgänger}(v) := u$

Anhang B - Fahrmotive, Fahrstile, Gefühle & Einstellungen zur Bedeutung des Autos nach Adel et al. (1997)

Auslebe-Motiv: Risikolust und Bedürfnis nach Selbstbestätigung bedingen eine sportlich riskante Fahrweise: Autofahren als Nervenkitzel, Austesten der Grenzen des Fahrvermögens, anderen imponieren wollen, sich mit anderen messen wollen

Ängstlichkeit: Angst im Verkehr bedingt eine defensiv-vermeidende Fahrweise: Gefährliche Situationen werden gemieden; z. T. auch unsicheres Fahrverhalten

Erregbarkeit: Schnelle und häufige Reizbarkeit, äußert sich in häufigem Schimpfen; auch leicht zu gefährlichen Reaktionen zu verleiten (z. B. Abbremsen bei dichtem Auffahren)

Gleit-Motiv: Bedürfnis nach ruhigem, gemütlichen Dahingleiten bedingt eine ruhige, gleichförmige Fahrweise, abrupte Wechsel werden vermieden und die umliegende Gegend betrachtet

Entspannung: Das Autofahren macht Spaß, dient der Entspannung und Zerstreuung. Offen bleibt, ob Entspannung durch Ausleben oder Gleiten realisiert wird. Insofern handelt es sich um ein übergreifendes Konstrukt

Autonomie-Gefühl: Gefühl der Freiheit und Unabhängigkeit: Bewusstsein, jederzeit an jeden Ort fahren zu können; tun und lassen können, was man will, alles im Griff zu haben

Abwehr von Vorschriften: Ablehnung von Verkehrsreglementierungen (z. B. Tempolimits) als Bevormundung, bewusstes Übertreten von als unsinnig empfundenen Vorschriften

Sicherheitsdenken: Absicherung durch Beachtung von Sicherheitsaspekten; wichtig ist: Sicherheitsausstattung, regelmäßige Inspektionen, ein sicheres Gefühl haben

Hobby: Starkes Interesse für alles, was mit dem Thema „Auto“ zu tun hat: Pflege, Wartung und Reparaturen; das Auto in und auswendig zu kennen

Medieninteresse: Häufiges Lesen von Autozeitschriften, Anschauen von Fernsehsendungen zum Thema Auto (relativ hohe Korrelation mit Hobby-Dimension)

Prestige: Auto als Statussymbol: Man will zeigen, wer man ist und wo man steht, will bewundert werden

Umwelt-Motiv: Bereitschaft, sich der Umwelt zuliebe beim Autofahren einzuschränken: Auf Kraftstoffverbrauch achten, langsamer fahren

Verzichtsbereitschaft: Bereitschaft, das Auto seltener zu benutzen: Keine kurzen Strecken mit dem Auto, möglichst oft öffentliche Verkehrsmittel benutzen

Anhang C – Fragebogen zur Fahrertypisierung

**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.**
in der Helmholtz-Gemeinschaft

DLR Institut für Verkehrsführung und Fahrzeugsteuerung
Postfach 12 62, 38022 Braunschweig

Institut für
Verkehrsführung und
Fahrzeugsteuerung

Fragebogen

Im Folgenden finden Sie eine Reihe von Fragen, die sich mit dem Thema "Navigation und Routenplanung" befassen.

Bitte kreuzen Sie die Antwort/en an, die am ehesten auf Sie zutrifft/zutreffen. Es gibt keine richtigen oder falschen Antworten.

Antworten Sie bitte aufrichtig und ohne lange zu überlegen. Die Untersuchung dient allein wissenschaftlichen Forschungszwecken. Der Datenschutz ist gewährleistet; geben Sie bitte nicht Ihren Namen an, sondern machen Sie lediglich die Angaben zur Person.
Das Ausfüllen des Fragebogens dauert etwa eine halbe Stunde.

Datum: _____

Geschlecht: weiblich ☐ männlich ☐

Geburtsdatum: _____





Verheiratet: ja ☐ nein ☐

Kinder: ja ☐ nein ☐

Beruf: _____

Fragen zu den Fahrgewohnheiten

1. Welche Klassen beinhaltet Ihr Führerschein, wann wurde er ausgestellt, und wieviele Kilometer fahren Sie durchschnittlich im Jahr pro Klasse im Jahr ?

				
Neu	A,A1	B,BE,C1,C1E	C, CE	D,DE,D1,D1E
Alt	1,1a,1b	3	2	2+3
Ausstellungsjahr*	1a)	1b)	1c)	1d)
Km pro Jahr	1f)	1g)	1h)	1i)

*...bei aufeinander aufbauenden Klassen (z.B.: 1, 1a, 1b) das Jahr der zuerst ausgestellten Klasse

2. Wieviel Prozent Ihrer gefahrenen Gesamtkilometer sind Sie im Stadtverkehr, auf Autobahnen und auf Landstraßen gefahren? (Grobe Schätzung)

	Stadtverkehr	Autobahn	Landstraße
Km in %	2a)	2b)	2c)

3. Besitzen Sie ein eigenes Fahrzeug?

Ja
☐

Nein
☐

3a)

Wenn ja, geben Sie bitte die Motorleistung und die im Fahrzeugschein eingetragene Höchstgeschwindigkeit Ihres Autos an.

Motorleistung: _____ KW oder _____ PS

3b)

Höchstgeschwindigkeit: _____ km/h

3c)

4. Müssen Sie zum Ausüben Ihres Berufes einen Führerschein besitzen?

Ja
☐

Nein
☐

4)

5. Was ist Ihre bevorzugte Geschwindigkeit auf Autobahnen?

5)

< 80 80 90 100 110 120 130 140 150 160 170 180 190 200 >200

	trifft voll und ganz zu	trifft eher zu	trifft eher nicht zu	trifft überhaupt nicht zu
	2	1	-1	-2
	trifft voll und ganz zu			trifft überhaupt nicht zu
Autofahren ist für mich auch eine sportliche Herausforderung.	4	3	2	1
Im Straßenverkehr gibt es zu viele Vorschriften.	4	3	2	1
Manchmal habe ich Lust, einfach durch die Gegend zu fahren.	4	3	2	1
Wenn es auf den Straßen hektisch zugeht, fühle ich mich sehr unwohl.	4	3	2	1
Ich fluche oft beim Autofahren.	4	3	2	1
Wenn ich beim Auto Beifahrer bin, ertappe ich mich oft dabei, daß ich mit den Füßen fast nach den Pedalen suche.	4	3	2	1
Ich fahre am liebsten immer gemütlich.	4	3	2	1
Ich fahre wirklich gerne Auto.	4	3	2	1
Am wohlsten fühle ich mich, wenn ich mit dem Auto "dahingleite".	4	3	2	1
Beim Autofahren halte ich mich strikt an die Verkehrsregeln.	1	2	3	4
Mit Autofahren verbinde ich das Gefühl von Freiheit und Unabhängigkeit.	4	3	2	1
Im dichten Straßenverkehr kommt es mir auf das geschickte Ausnutzen jeder Lücke an.	4	3	2	1
Schnelles Fahren flößt mir Unbehagen ein.	4	3	2	1
Beim Autofahren kann ich mich sehr gut entspannen.	4	3	2	1
Oft fühle ich mich nur in meinem Auto richtig wohl.	4	3	2	1
Generelle Tempolimits halte ich für eine Bevormundung des Autofahrers.	4	3	2	1

	trifft voll und ganz zu		trifft überhaupt nicht zu	
Lange Strecken fahre ich nicht gerne.	4	3	2	1
Ohne mein Auto fühl ich mich nur wie ein halber Mensch.	4	3	2	1
Früher bin ich überhaupt viel wilder gefahren als heute.	4	3	2	1
Das Auto ist ein notwendiges Übel, das man nur benutzen sollte, wenn es gar nicht anders geht.	1	2	3	4
Ich fahre manchmal extra langsam, wenn einer hinter mir drängelt.	4	3	2	1
Beim Autofahren schaue ich mir gern die Gegend an.	4	3	2	1
Wenn ich in meinem Auto fahre, habe ich alles im Griff.	4	3	2	1
Ein bißchen Nervenkitzel gehört für mich zum Autofahren dazu.	4	3	2	1
Es macht mir Spaß, mich im Autoverkehr mit anderen Autofahrern zu messen.	4	3	2	1
Im heutigen Straßenverkehr bekommt man es oft mit der Angst zu tun.	4	3	2	1
Manchmal komme ich beim Autofahren so in Rage, daß ich mich erst nach einiger Zeitwieder beruhige.	4	3	2	1
Ich fahre häufig ohne bestimmtes Ziel umher.	4	3	2	1
Mein Auto braucht nicht schön zu sein.	4	3	2	1
Es kommt schon mal vor, daß ich ins Auto steige und noch nicht genau weiß, wohin ich eigentlich fahren möchte.	4	3	2	1
Autos sind nützlich, sonst nichts.	4	3	2	1
Das Auto dient allein dem raschen Ortswechsel.	4	3	2	1
Bei manchen Fahrern muß man auf der Autobahn schon mal dicht auffahren.	4	3	2	1
Beim Autofahren erlebe ich Situationen, die viel erregender und spannender sind als mein normaler Alltag.	4	3	2	1
Eigentlich gehöre ich zu etwas ängstlicheren Autofahrern.	4	3	2	1

	trifft voll und ganz zu		trifft überhaupt nicht zu	
Ich will die Möglichkeit haben, unabhängig von Fahrplänen und ähnlichem an einen beliebigen Ort zu kommen..	4	3	2	1
Beim Autofahren versuche ich gelegentlich, meine fahrerischen Grenzen herauszufinden.	4	3	2	1
Wenn man geschickt ist, kann man auch bei dichtem Gegenverkehr überholen.	4	3	2	1
Ich fahre gerne bei schwierigen Witterungsbedingungen.	4	3	2	1
Auf der Autobahn bekommt man es oft mit der Angst zu tun.	4	3	2	1
Ich telefoniere, während ich Auto fahre	4	3	2	1
Zum Telefonieren halte ich an / fahre ich auf einen Rastplatz	4	3	2	1
Wenn ich im Stau stehe, fange ich aus Zeitvertreib an zu telefonieren.	4	3	2	1
Wenn ich im Stau stehe, rufe ich denjenigen an, zu dem ich unterwegs bin um meine Verspätung mitzuteilen.	4	3	2	1
In einem größerem Auto fühle ich mich sicherer.	4	3	2	1
Alles, was mit dem Thema Auto zu tun hat, interessiert mich sehr.	4	3	2	1
Ich mag es, wenn mir andere Autofahrer bewundernd nachblicken.	4	3	2	1
Der Umwelt zuliebe, halte ich mich an Tempo 130.	4	3	2	1
Öffentliche Verkehrsmittel finde ich sehr gut und benutze sie auch so oft wie möglich.	4	3	2	1
Ich bringe mein Auto regelmäßig zur Inspektion.	4	3	2	1
Ich kenne meine Auto in und auswendig.	4	3	2	1
Mit seinem Auto kann man zeigen, wer man ist und wo man steht.	4	3	2	1
Der Umwelt zuliebe fahre ich nicht bei erhöhten Ozonwerten.	4	3	2	1
Ich nehme auch für kurze Strecken das Auto.	1	2	3	4

	trifft voll und ganz zu		<i>Anhang</i> trifft überhaupt nicht zu	
Ich bastele gerne an meinem Auto.	4	3	2	1
Der Umwelt zuliebe wähle ich mein Tempo so, dass möglichst wenig Kraftstoff verbraucht wird.	4	3	2	1
Ich kaufe gerne Autozubehör.	4	3	2	1
Ich führe an meinem Auto eine Reihe von Reparaturen selbst aus.	4	3	2	1
Ich tue schon was dafür, dass sich mein Auto außen und innen von anderen Autos des gleichen Typs unterscheidet.	4	3	2	1
Mein Fahrstil wechselt stark mit meiner Stimmung.	4	3	2	1
Bei einem Auto kommt es für mich vor allem auf Geschwindigkeit und PS-Leistung an.	4	3	2	1

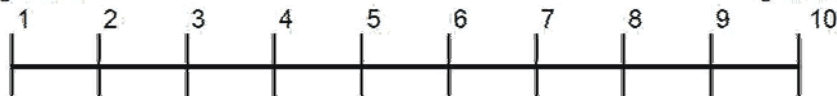
C) Fahrpräferenzen

Sie sehen nun einige Fotos, auf denen Straßenabschnitte abgebildet sind. Schauen Sie bitte zuerst alle Fotos an. Überlegen Sie, wie gern Sie auf diesen Straßenabschnitten in Ihrer Freizeit fahren würden.

Bringen Sie die Fotos anschließend in eine Reihenfolge: weisen Sie den Fotos die Zahlen 1 bis 10 zu. Unter den Streckenabschnitt, den sie am liebsten befahren würden, schreiben Sie die 1, unter den Abschnitt, den Sie am wenigsten gern befahren würden, die 10. Jede Ziffer darf nur einmal verwendet werden.

hier würde ich
am liebsten
entlang fahren

hier würde ich
am wenigsten
gern fahren





Mobilität

1. An wieviel Tagen pro Woche sind Sie durchschnittlich mit dem Auto unterwegs?

seltener	1	2	3	4	5	6	7
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

2. An wieviel Tagen pro Woche benutzen Sie durchschnittlich öffentliche Verkehrsmittel?

seltener	1	2	3	4	5	6	7
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

3. An wieviel Tagen pro Woche sind Sie durchschnittlich länger als 15 Minuten mit dem Fahrrad oder zu Fuss unterwegs?

seltener	1	2	3	4	5	6	7
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Situation auf der Autobahn

Bitte stellen Sie sich nun folgende Situation vor: Sie fahren mit 130 Stundenkilometern auf der linken Spur der Autobahn und überholen gerade einige Fahrzeuge. Im Rückspiegel sehen Sie ein Auto mit sehr hoher Geschwindigkeit auf Sie zukommen. Es bremst scharf ab, setzt sich dann ganz dicht- so dicht, daß Sie das Nummernschild nicht mehr im Rückspiegel sehen - hinter Sie und betätigt die Lichthupe.

Was empfinden Sie hierbei? Kreuzen Sie bitte die Antwort an, die am ehesten auf Sie zutrifft.

Ich habe Todesangst.	<input type="checkbox"/>	4
Ich bin sehr beunruhigt und fühle mich ernsthaft bedroht.	<input type="checkbox"/>	3
Ich bin sehr beunruhigt, fühle mich aber nicht direkt bedroht.	<input type="checkbox"/>	2
Das stört mich nicht weiter.	<input type="checkbox"/>	1

Fahren mit einem Navigationsgerät

Stellen Sie sich vor, Sie fahren in ihrer Freizeit eine längere Autostrecke (200 bis 500 km). Sie besitzen ein Navigationsgerät, das Ihnen Vorschläge für Ihre persönliche Streckengestaltung liefert, z.B. schlägt es Ihnen eine "Strecke vorwiegend über Landstraße" vor.

Kreuzen Sie innerhalb der Bedingungen "Sie fahren allein" und "Sie fahren in Begleitung" an, wie interessant Sie die vorgeschlagenen Fahrmöglichkeiten finden.

	sehr interessant 2	interessant 1	weniger interessant -1	überhaupt nicht interessant -2
	allein		in Begleitung	
Strecke über vorwiegend Landstraße	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2
Strecke über vorwiegend Autobahn	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2
Strecke über Autobahn und Landstraße im Wechsel	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2
bei dichtem Autobahnverkehr Strecke über Landstraße	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2
landschaftlich reizvolle Wegführung	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2
Umgehung von Autobahnen mit Autobahngebühr	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2
Hinweise auf Sehenswürdigkeiten am Rande der Strecke	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2
	allein		in Begleitung	
unkomplizierte, überschaubare Wegführung (Vermeidung von allzu häufigem Autobahnwechsel/Straßenwechsel)	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2
Umgehung von Tunnelfahrten	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2
Wenn möglich, Anbieten einer kurvenreichen Strecke	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2
Umgehung von stark kurvenreichen Strecken	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2
kürzeste Strecke zum Ziel (Fahrdistanz)	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> -1	<input type="checkbox"/> -2

schnellste Strecke zum Ziel (Fahrgeschwindigkeit)	2 1 -1 -2	2 1 -1 -2
Umgehung von Kreisverkehrssituationen	2 1 -1 -2	2 1 -1 -2
Pausenplanung vor Fahrtantritt	2 1 -1 -2	2 1 -1 -2
Spontane Pausengestaltung bei Bedarf	2 1 -1 -2	2 1 -1 -2

Fahren mit einem Navigationsgerät

Hinweise im Zusammenhang mit der Pausengestaltung auf...

	allein	in Begleitung
Sehenswürdigkeiten	2 1 -1 -2	2 1 -1 -2
Spatziergeh-Möglichkeiten	2 1 -1 -2	2 1 -1 -2
landschaftlich reizvolle Rastplätze	2 1 -1 -2	2 1 -1 -2
Fastfood-Restaurants	2 1 -1 -2	2 1 -1 -2
Einkehrmöglichkeiten (kein Fast-food)	2 1 -1 -2	2 1 -1 -2

Empfehlungen bei Stau...

	allein	in Begleitung
Umleitung über eine andere Autobahnverbindung	2 1 -1 -2	2 1 -1 -2
Umleitung über Landstraßen	2 1 -1 -2	2 1 -1 -2
Umleitung an Sehenswürdigkeiten vorbei	2 1 -1 -2	2 1 -1 -2
Umleitung an Einkehrmöglichkeiten vorbei	2 1 -1 -2	2 1 -1 -2

Fahren mit einem Navigationsgerät

Vorschläge in einer Ihnen unbekannten Stadt...

	allein	in Begleitung								
eine Strecke mit möglichst wenigen Linksabbiegungen (evtl. etwas länger)	<table><tr><td>2</td><td>1</td><td>-1</td><td>-2</td></tr></table>	2	1	-1	-2	<table><tr><td>2</td><td>1</td><td>-1</td><td>-2</td></tr></table>	2	1	-1	-2
2	1	-1	-2							
2	1	-1	-2							
eine überschaubare Streckenführung (wenig Abbiegevorgänge, evtl. etwas länger)	<table><tr><td>2</td><td>1</td><td>-1</td><td>-2</td></tr></table>	2	1	-1	-2	<table><tr><td>2</td><td>1</td><td>-1</td><td>-2</td></tr></table>	2	1	-1	-2
2	1	-1	-2							
2	1	-1	-2							
eine Strecke, die Kreisverkehrssituationen umgeht (evtl. etwas länger)	<table><tr><td>2</td><td>1</td><td>-1</td><td>-2</td></tr></table>	2	1	-1	-2	<table><tr><td>2</td><td>1</td><td>-1</td><td>-2</td></tr></table>	2	1	-1	-2
2	1	-1	-2							
2	1	-1	-2							
die kürzeste Strecke (auch über Nebenstraßen, evtl. viele Abbiegevorgänge)	<table><tr><td>2</td><td>1</td><td>-1</td><td>-2</td></tr></table>	2	1	-1	-2	<table><tr><td>2</td><td>1</td><td>-1</td><td>-2</td></tr></table>	2	1	-1	-2
2	1	-1	-2							
2	1	-1	-2							
eine Strecke an Sehenswürdigkeiten vorbei	<table><tr><td>2</td><td>1</td><td>-1</td><td>-2</td></tr></table>	2	1	-1	-2	<table><tr><td>2</td><td>1</td><td>-1</td><td>-2</td></tr></table>	2	1	-1	-2
2	1	-1	-2							
2	1	-1	-2							
Umgehung von dicht/stark befahrenen Straßen (auch über Nebenstraßen, evtl. viele Abbiegevorgänge)	<table><tr><td>2</td><td>1</td><td>-1</td><td>-2</td></tr></table>	2	1	-1	-2	<table><tr><td>2</td><td>1</td><td>-1</td><td>-2</td></tr></table>	2	1	-1	-2
2	1	-1	-2							
2	1	-1	-2							

Hinweise in einer Ihnen unbekannten Stadt auf...

	allein	in Begleitung								
Theater	<table><tr><td>2</td><td>1</td><td>-1</td><td>-2</td></tr></table>	2	1	-1	-2	<table><tr><td>2</td><td>1</td><td>-1</td><td>-2</td></tr></table>	2	1	-1	-2
2	1	-1	-2							
2	1	-1	-2							
Restaurants	<table><tr><td>2</td><td>1</td><td>-1</td><td>-2</td></tr></table>	2	1	-1	-2	<table><tr><td>2</td><td>1</td><td>-1</td><td>-2</td></tr></table>	2	1	-1	-2
2	1	-1	-2							
2	1	-1	-2							
Austellungen	<table><tr><td>2</td><td>1</td><td>-1</td><td>-2</td></tr></table>	2	1	-1	-2	<table><tr><td>2</td><td>1</td><td>-1</td><td>-2</td></tr></table>	2	1	-1	-2
2	1	-1	-2							
2	1	-1	-2							
Parks	<table><tr><td>2</td><td>1</td><td>-1</td><td>-2</td></tr></table>	2	1	-1	-2	<table><tr><td>2</td><td>1</td><td>-1</td><td>-2</td></tr></table>	2	1	-1	-2
2	1	-1	-2							
2	1	-1	-2							
Kino	<table><tr><td>2</td><td>1</td><td>-1</td><td>-2</td></tr></table>	2	1	-1	-2	<table><tr><td>2</td><td>1</td><td>-1</td><td>-2</td></tr></table>	2	1	-1	-2
2	1	-1	-2							
2	1	-1	-2							
Veranstaltungen	<table><tr><td>2</td><td>1</td><td>-1</td><td>-2</td></tr></table>	2	1	-1	-2	<table><tr><td>2</td><td>1</td><td>-1</td><td>-2</td></tr></table>	2	1	-1	-2
2	1	-1	-2							
2	1	-1	-2							

Abschlussfragen

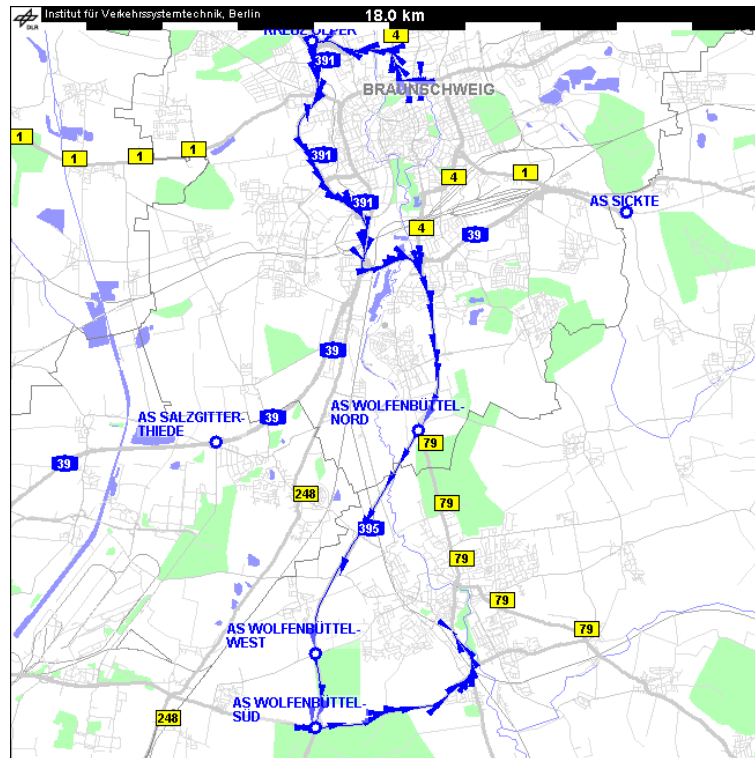
Und zum Schluss noch ein paar Angaben zu Ihrer Person.

Kreuzen Sie bitte spontan - ohne lange zu nachzudenken - an, ob die folgenden Aussagen tendenziell eher stimmen oder nicht stimmen.

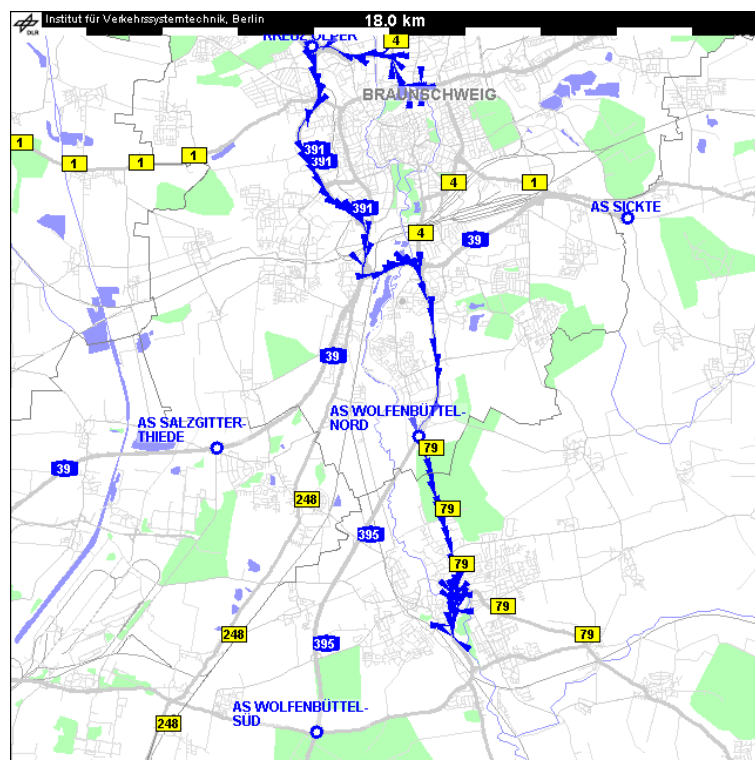
Ich gehe abends gerne aus.	stimmt 1) <input type="checkbox"/>	stimmt nicht <input type="checkbox"/>
Ich bin unternehmungslustiger als die meisten meiner Bekar	stimmt 2) <input type="checkbox"/>	stimmt nicht <input type="checkbox"/>
Ich habe fast immer eine schlagfertige Antwort bereit.	stimmt 3) <input type="checkbox"/>	stimmt nicht <input type="checkbox"/>
Sind wir in ausgelassener Runde, so überkommt mich oft ein Lust zu groben Streichen.	stimmt 4) <input type="checkbox"/>	stimmt nicht <input type="checkbox"/>
In einer vergnügten Gesellschaft kann ich mich meistens un und unbeschwert auslassen.	stimmt 5) <input type="checkbox"/>	stimmt nicht <input type="checkbox"/>
Ich übernehme bei gemeinsamen Unternehmungen gern die	stimmt 6) <input type="checkbox"/>	stimmt nicht <input type="checkbox"/>
Ich kann in eine ziemlich langweilige Gesellschaft schnell Le	stimmt 7) <input type="checkbox"/>	stimmt nicht <input type="checkbox"/>
Ich würde mich selbst als eher gesprächig bezeichnen.	stimmt 8) <input type="checkbox"/>	stimmt nicht <input type="checkbox"/>
Ich schließe nur langsam Freundschaften.	stimmt 9) <input type="checkbox"/>	stimmt nicht <input type="checkbox"/>
Ich spiele anderen Leuten gern einen harmlosen Streich.	stimmt 10) <input type="checkbox"/>	stimmt nicht <input type="checkbox"/>
Bei Geselligkeiten und öffentlichen Veranstaltungen bleibe ic Hintergrund.	stimmt 11) <input type="checkbox"/>	stimmt nicht <input type="checkbox"/>
Bei wichtigen Dingen bin ich bereit, mit anderen energisch z	stimmt 12) <input type="checkbox"/>	stimmt nicht <input type="checkbox"/>
Ich habe gern mit Aufgaben zu tun, die schnelles Handeln er	stimmt 13) <input type="checkbox"/>	stimmt nicht <input type="checkbox"/>
Ich bin ziemlich lebhaft.	stimmt 14) <input type="checkbox"/>	stimmt nicht <input type="checkbox"/>

Vielen Dank!

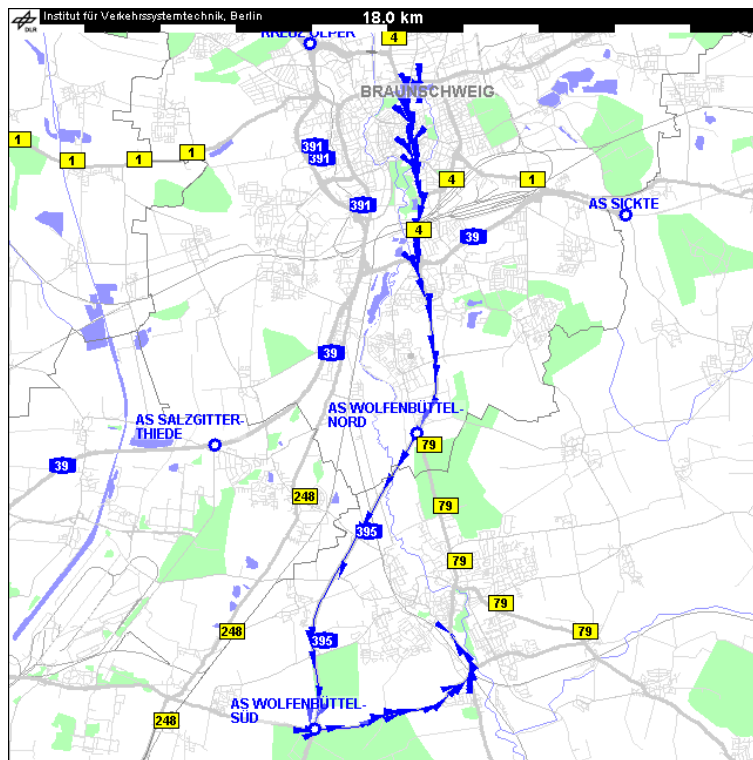
Anhang D – Auswertung individuell Entspannte Routen



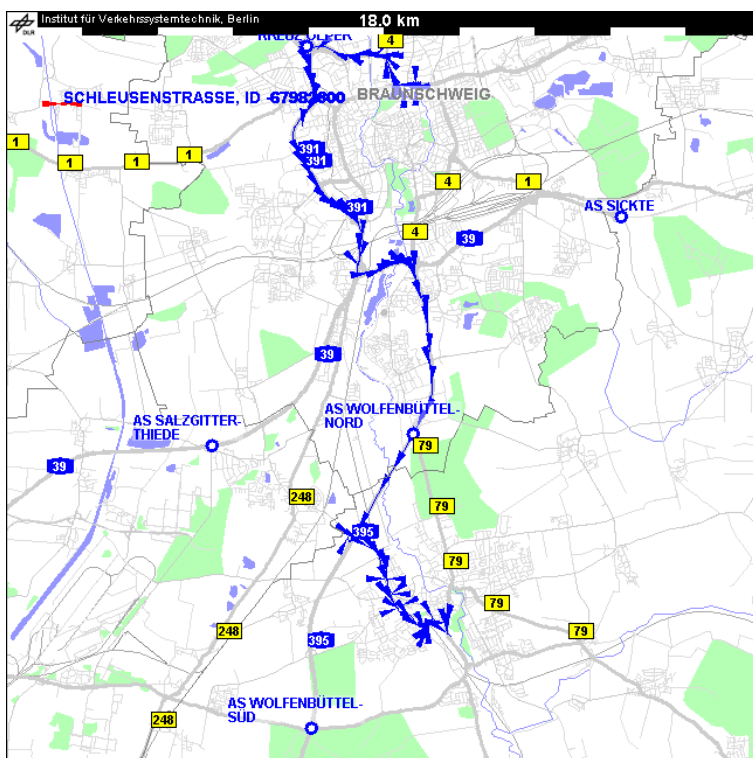
Entspannte Route – Variante 1



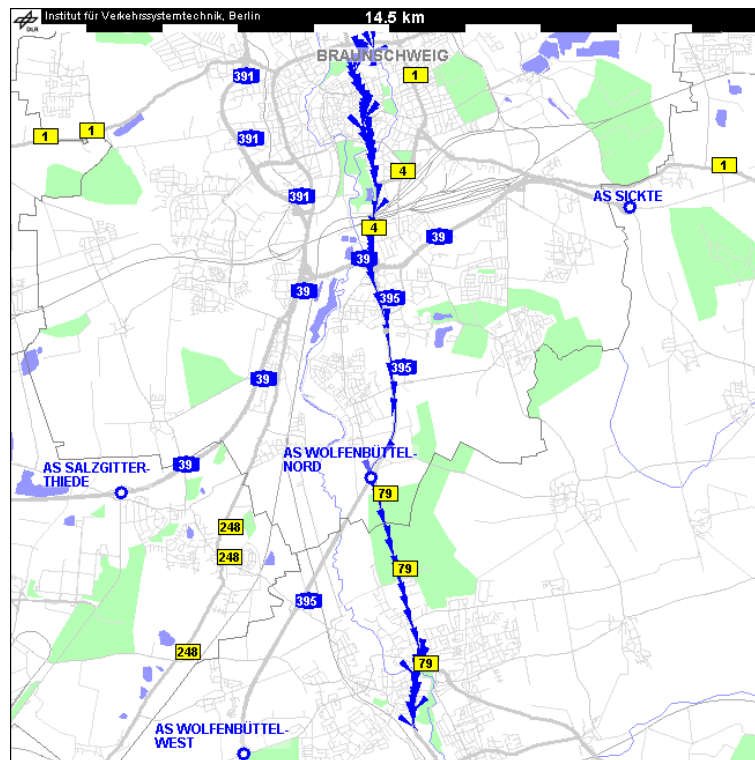
Entspannte Route – Variante 2



Entspannte Route – Variante 3



Entspannte Route – Variante 4



Entspannte Route – Variante 5 entspricht Schnellster Route

Anhang E – Auswertung

Fahrer (VPNr)	Profil belastend (poten- tiell belastend)	Routen- variante	Zeit Entspannte/Schnellste Route (min:sec)	Herzrate Entspannte/Schnellste Rou- te (Schläge pro Minute)
123	C1, C2 (C3)	5	-	-
145	B2, C1, C3	4	26:05 / 21:15	74,6 (SD=5,5) / 78,7 (SD=6,60)
194	C3 (B3, C1)	3	22:25 / 21:02	Fehlerbehaftete Datenauf- zeichnung
196	C3 (A3, C1, C2)	5	-	-
679	B2, B3, C3	2	24:05 / 20:35	87,6 (SD=7,40) / 89,3 (SD=6,88)
700	C1, C2, C3 (B2)	4	24:33 / 22:02	74,6 (SD=4,63) / 76,4 (SD=4,90)
736	C3 (C2)	5	-	-
769	B2, C3 (B3)	2	22:05 / 19:55	66,2 (SD=5,68) / 70,5 (SD=4,65)
808	B2, C1, C3	4	23:28 / 21:27	Fehlerbehaftete Datenauf- zeichnung
812	B3, C3	3	24:09 / 21:00	58,4 (SD=6,16) / 61,0 (SD=5,98)
814	B2, C1, C3	4	30:38 / 22:10	75,4 (SD=4,04) / 79,2 (SD=4,57)
820	B3, C3 (B2)	1	23:11 / 18:19	70,4 (SD= 3,35) / 72,7 (SD=3,4)